

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes.

Desde tiempos antiguos, las civilizaciones han buscado formas de transportar agua a zonas remotas o elevarla a mayores alturas utilizando principios hidráulicos.

Uno de los primeros registros de un dispositivo similar a la bomba de ariete data del año 1796, donde el ingeniero francés Joseph-Michel Montgolfier patentó un mecanismo que aprovechaba la energía cinética del agua para elevar parte del flujo a una altura mayor. Si bien su dispositivo no era exactamente una bomba de ariete en su forma moderna, sentó las bases para futuros desarrollos.

De ahí en adelante ingenieros contribuyeron a mejorar la eficiencia y el diseño de este dispositivo. Experimentaron con diferentes configuraciones y materiales y desarrollaron métodos para optimizar el rendimiento de las bombas de ariete.

Las bombas de ariete funcionan según el principio de cierre de una válvula y la generación de ondas de presión. Cuando el flujo de agua a alta velocidad es interrumpido, por ejemplo, al cerrar una válvula en una tubería, el agua continúa su movimiento con fuerza, creando una onda de choque que viaja hacia atrás a lo largo de la tubería. Esta onda de choque genera una presión muy alta en el sistema, lo que permite que una pequeña cantidad de agua sea desviada a una tubería más pequeña, conocida como "tubo de impulso" o "tubo de descarga". La presión generada por esta onda de choque en el tubo de descarga es suficiente para levantar una parte del agua a una altura mayor que la fuente de suministro original, lo que permite que el ariete hidráulico bombee agua a alturas considerables sin la necesidad de una fuente de energía externa.

Las bombas de ariete tienen diversas aplicaciones prácticas en la actualidad. Se utilizan en sistemas de abastecimiento de agua en áreas rurales donde no hay acceso a electricidad. Además, las bombas de ariete se utilizan para sistemas de riego, pueden ayudar a elevar el agua desde fuentes naturales, como arroyos o canales y distribuirla a través de tuberías hacia los campos de cultivo. Los arietes hidráulicos también son empleados en situaciones de emergencia o desastres naturales, donde la infraestructura eléctrica puede estar dañada o

inaccesible, son útiles para proporcionar agua potable a las comunidades afectadas. Su funcionamiento simple y autónomo las convierte en una solución eficaz en casos de escasez de agua.

Existen muchos de fabricantes y modelos por todo el mundo. Las investigaciones actuales en el campo de las bombas de ariete se centran en mejorar la eficiencia y el rendimiento de estos dispositivos. Se están realizando estudios sobre nuevos diseños, materiales más resistentes y aplicaciones específicas en diferentes contextos, como comunidades rurales o proyectos de desarrollo sostenible.

1.2. Planteamiento del problema.

1.2.1. Descripción del problema.

El agua sostiene la vida en la Tierra, es un recurso imprescindible para los seres humanos, los animales y las plantas; debido a que es un recurso limitado su escasez o difícil acceso puede tener graves consecuencias en muchos ámbitos, incluyendo la producción de alimentos, el medio ambiente, la economía y la salud humana.

Existe variedad de dispositivos diseñados para facilitar el transporte del agua, entre ellos los disímiles sistemas de bombeo que para ser impulsados emplean energías de diferentes tipos. El funcionamiento de algunos de los sistemas depende de energía fósil y/o energía eléctrica que provoca el incremento en el costo de su instalación, operación y mantenimiento.

El uso de bombas que emplean energía fósil tiene varias desventajas una de ellas es que estos combustibles son finitos y no renovables, lo que significa que su disponibilidad se agotará eventualmente; su uso contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, lo que a su vez contribuye al cambio climático.

Con el pasar del tiempo el precio de los hidrocarburos se incrementa en el mercado y con él la dificultad de adquirir energía eléctrica en el campo, Por estas razones, muchas personas y organizaciones están buscando alternativas más sostenibles a las bombas que usan energía fósil y/o eléctrica, como las bombas solares, eólicas o hidráulicas, que emplean fuentes de energía renovable que son más amigables con el medio ambiente.

La bomba de ariete hidráulico es una de ellas, funciona aprovechando la fuerza de la inercia del agua en movimiento, creando un efecto de martillo que impulsa el agua a través de la tubería.

Países como México, Brasil, Perú, Ecuador y Colombia están logrando obtener resultados impresionantes a partir del uso de la bomba de ariete, siendo utilizada para proveer agua en áreas rurales donde no tienen acceso a la red eléctrica y poseen escasos recursos financieros; incrementando el número de usuarios que logran beneficiarse de la tecnología que se desarrolla mediante esta bomba.

En Bolivia también encontramos zonas donde se dificulta el acceso al indispensable líquido elemento, lo que obstaculiza el desarrollo del país y dificulta la calidad de vida de sus habitantes. En busca de implementar y aprovechar alternativas que permitan el suministro de agua, se pretende indagar en sistemas hidráulicos que hagan uso de energías verdes, sean económicamente accesibles y de fácil montaje como es el caso de las bombas de ariete.

En nuestro país, se han implementado diversos proyectos que han recurrido a la tecnología de la bomba de ariete hidráulico como una solución innovadora para abordar el acceso al agua en áreas rurales. La mayoría de estos proyectos han sido llevados a cabo por empresas privadas.

Empresas como “Rikchary Srl”, "DAGUA D.I. Bolivia", "Talleres AES Ltda", “Metalúrgica San José”, se dedican a la fabricación, distribución e instalación de bombas de ariete en el territorio nacional, estas han instalado diferentes tipos de bombas de ariete en ubicaciones estratégicas. Algunos de estos sitios incluyen localidades como Aiquile y Tiraque en el departamento de Cochabamba, así como áreas cercanas al Lago Titicaca en el departamento de La Paz, en Santa Cruz, entre otros. La presencia de estas empresas nacionales fortalece la capacidad de desarrollo y expansión de la tecnología de la bomba de ariete en el país.

Es importante destacar también la contribución de empresas extranjeras, entre ellas "Hidroinka" e “Hidroaxon” de Perú, que está incursionado en el mercado boliviano y están brindando sus servicios para la implementación y el desarrollo de proyectos relacionados con la bomba de ariete hidráulico.

A pesar de los proyectos mencionados, el aprovechamiento de los beneficios proporcionados por la tecnología de la bomba de ariete hidráulico aún es limitado entre los beneficiarios

bolivianos. En particular, en zonas rurales y remotas donde la falta de acceso a la energía eléctrica es una realidad constante y la logística de transporte y distribución de combustibles como el gasolina o diésel puede ser costosa y complicada, la instalación y disponibilidad de la bomba de ariete podría representar una solución para garantizar el acceso al agua y mejorar significativamente la calidad de vida de las comunidades.

1.2.2. Planteamiento del problema.

La disponibilidad de agua es esencial para el desarrollo humano, especialmente en áreas rurales y remotas donde las fuentes de energía convencionales pueden ser limitadas o inexistentes. En estas áreas, el suministro de agua es fundamental para cubrir las necesidades básicas de la población, como el consumo humano, la agricultura y la ganadería. Sin embargo, las soluciones convencionales, como las bombas a combustión, presentan limitaciones en términos de eficiencia y costos operativos, además de depender de recursos económicos y combustibles fósiles.

En este contexto, la bomba de ariete emerge como una tecnología prometedora que aprovecha la energía hidráulica disponible en corrientes de agua para bombear agua a alturas significativas sin la necesidad de energía externa.

A pesar de sus ventajas potenciales, la adopción y aplicación generalizada de la bomba de ariete en entornos rurales sigue siendo limitada. Existen diversas barreras técnicas, económicas y sociales que dificultan y limitan su implementación efectiva. Entre estas barreras se encuentran la falta de conocimiento técnico sobre el diseño y funcionamiento de la bomba de ariete, los costos asociados con su instalación y mantenimiento, así como la resistencia a la adopción de nuevas tecnologías por parte de las comunidades rurales.

En este sentido, surge la necesidad de investigar el potencial y las limitaciones de la bomba de ariete como una solución viable para la provisión de agua en áreas rurales. Se requiere una comprensión más profunda de los factores que influyen en su desempeño, así como el desarrollo de estrategias para superar las barreras existentes, evaluar su viabilidad en diferentes contextos geográficos y socioeconómicos y promover su adopción.

1.2.3. Formulación del problema.

¿Cuáles son los factores determinantes que posicionan al ariete hidráulico como una alternativa superior para el bombeo de caudales en comparación con las bombas que utilizan energía eléctrica y fotovoltaica?

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo General.

Proponer el ariete hidráulico para el bombeo de caudales como una alternativa viable a las bombas que dependen de energía eléctrica y fotovoltaica, a través de la evaluación técnica, su instalación y operación, con la finalidad de contar con los conocimientos necesarios para la selección óptima de bombas hidráulicas en aplicaciones específicas.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Sistematizar la información técnica de las bombas de ariete disponibles en nuestro medio y en el mercado para una selección adecuada técnica y económicamente viable.
- Analizar y profundizar los criterios técnicos y la tipología de la bomba de ariete, además de las ventajas y limitaciones de su instalación en campo.
- Elaborar las curvas características de una bomba de ariete y estudiar los parámetros que intervienen en las mismas.
- Comparar el desempeño del ariete hidráulico frente a las bombas que operan con energía eléctrica y fotovoltaica, analizando aspectos como consumo energético, costos operativos y requisitos de mantenimiento.
- Evaluar los resultados obtenidos del trabajo realizado empleando la tecnología del ariete hidráulico.

1.4. Hipótesis.

La bomba de ariete es una mejor alternativa técnica, económica y ambientalmente respecto a las bombas que dependen de energía eléctrica y fotovoltaica en zonas con características topográficas específicas.

1.5. Justificación.

1.5.1. Justificación académica.

La investigación sobre las bombas de ariete representa una oportunidad valiosa para adentrarse y enriquecer diversas disciplinas académicas, entre las que se destacan la ingeniería hidráulica, las energías renovables, las ciencias ambientales, el desarrollo rural y la gestión de recursos hídricos.

Existen vacíos de conocimiento y áreas de investigación abiertas en el campo de las bombas de ariete. Desde un enfoque académico, este estudio busca aportar nuevos conocimientos y perspectivas sobre el diseño, funcionamiento y aplicaciones de las bombas de ariete, así como la evaluación de su viabilidad técnica y económica en diferentes contextos, lo que contribuirá al desarrollo de soluciones innovadoras que ayuden a satisfacer la creciente demanda de agua en zonas rurales.

Este proyecto aspira a sentar las bases para investigaciones y proyectos académicos futuros vinculados con la tecnología de bombeo y la gestión sostenible del agua.

1.5.2. Justificación técnica.

Las bombas de ariete han sido utilizadas durante siglos, son una tecnología de bombeo única que aprovecha el principio del golpe de ariete para elevar agua a alturas considerablemente mayores que la fuente de suministro sin necesidad de energía eléctrica o combustible. Aunque esta tecnología ofrece ventajas significativas, como su simplicidad, bajo costo operativo e independencia energética, aún existen limitaciones técnicas y desafíos en su diseño, implementación y operación que requieren una comprensión más profunda, pues estos restringen su aplicabilidad y eficiencia en ciertos contextos.

Investigar y analizar los criterios técnicos, la tipología de las bombas de ariete y la variabilidad en función a diferentes factores permitirá identificar oportunidades de mejora, optimización y aplicación efectiva de esta tecnología, facilitando así su implementación en una variedad de aplicaciones y entornos.

1.5.3. Justificación social.

El abastecimiento de agua es un derecho humano fundamental y esencial para la salud y el bienestar de las personas. Sin embargo, muchas comunidades, especialmente en áreas rurales

y remotas, carecen de infraestructuras de suministro de agua adecuadas. Al desarrollar un mayor conocimiento sobre las bombas de ariete y su aplicación práctica, se pueden ofrecer alternativas viables y sostenibles para el abastecimiento de agua en estas comunidades, promoviendo su desarrollo y mejorando así su calidad de vida y su desarrollo social y económico, contribuyendo a la reducción de la pobreza y la desigualdad.

Además, este estudio también puede generar conciencia y promover la acción a nivel local, nacional e internacional en apoyo de soluciones sostenibles para el acceso al agua en áreas rurales, lo que beneficiaría a la sociedad en su conjunto al promover el desarrollo humano y la equidad en el acceso a los recursos hídricos.

1.6. Alcance.

Con el objetivo de realizar un análisis exhaustivo del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico, se llevará a cabo una investigación detallada sobre el fenómeno del golpe de ariete, mediante la compilación de información proveniente de diversas fuentes. Este estudio permitirá comprender en profundidad la ocurrencia de dicho fenómeno y su aplicación como principio fundamental en la operación del ariete hidráulico.

Será fundamental comprender los principios físicos que hacen posible su operación, así como identificar las diferentes componentes que conforman el ariete hidráulico y su respectiva función. Asimismo, se analizará minuciosamente el proceso de funcionamiento de la bomba, desde la entrada del agua hasta su salida a través de la tubería de descarga; para lo cual se fabricará un prototipo básico que permitirá mostrar el principio de funcionamiento. Se elaborará un manual para la construcción de un prototipo funcional de bomba de ariete

Otro aspecto relevante del estudio será la identificación de los requisitos y limitaciones para la instalación de la bomba de ariete, lo cual permitirá determinar en qué condiciones su uso resulta viable. Asimismo, se analizarán las diversas aplicaciones y beneficios de esta tecnología, tales como su bajo costo de operación y mantenimiento, su capacidad de funcionar sin requerir electricidad, entre otros, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los criterios técnicos que deben ser considerados en la evaluación de la bomba de ariete.

Se realizará una comparación entre un sistema de bombeo con una bomba de ariete hidráulico, un sistema convencional de bombeo eléctrico y bombeo fotovoltaico.

Con el fin de complementar la información teórica, se estudiará el desempeño de una bomba de ariete en funcionamiento y los criterios utilizados para seleccionar e instalar este tipo de bomba en particular. Se obtendrán las curvas características de la bomba de ariete en estudio analizando la variación del caudal de descarga y golpes por minuto en función a la altura de elevación. Se realizará una comparación entre los resultados teóricos y prácticos obtenidos.

El desarrollo de esta investigación permitirá establecer criterios base para futuros trabajos académicos en el campo de las bombas de ariete, aportando información valiosa y contribuyendo al avance tecnológico en este campo específico.

1.7. Metodología y plan de trabajo.

1.7.1. Metodología.

- I. **Sistematización de información:** La primera etapa de este estudio se centra en la meticulosa investigación destinada a recopilar y sistematizar información pertinente sobre la bomba de ariete. Este proceso implica el análisis detallado de su historia, principios de funcionamiento y estudios previos relevantes. Se llevará a cabo una descripción precisa de la configuración del sistema, que abarcará desde la fuente de agua hasta el punto de entrega. Además, se detallará minuciosamente la función desempeñada por cada una de las partes del sistema, así como las condiciones de operación que influyen en su desempeño.

El objetivo principal es obtener un conocimiento sólido y completo de la bomba de ariete, sentando las bases para el análisis y la comprensión detallada de su funcionamiento. Esto último permitirá tener los conocimientos necesarios para fabricar el prototipo de bomba de ariete.

Se estudiarán los sistemas de bombeo con energía eléctrica y energía fotovoltaica con el fin de tener suficiente información que permita compararlas con la bomba de ariete.

- II. **Evaluación técnica:** En esta etapa, se llevará a cabo la búsqueda de una bomba de ariete en funcionamiento con el propósito de llevar a cabo una evaluación técnica. Dicha evaluación implica un análisis exhaustivo del rendimiento hidráulico de la bomba, el dimensionamiento del sistema, las condiciones de operación y el

control del fenómeno conocido como golpe de ariete, entre otros aspectos de relevancia.

- III. Prueba en campo: El objetivo principal es obtener datos que permitan evaluar el desempeño real de la bomba de ariete bajo condiciones reales de operación.

Además de la medición de caudales, se prestará especial atención al análisis de los períodos que conforman el ciclo de trabajo del ariete. Se estudiará en detalle la duración y las características de cada período, identificando los momentos clave en los que ocurren cambios significativos en el sistema y analizando su impacto en el rendimiento general de la bomba de ariete.

Los resultados obtenidos en estas pruebas serán sometidos a un riguroso proceso de análisis y evaluación. Se compararán los caudales medidos en diferentes configuraciones y condiciones operativas, identificando las variaciones y tendencias significativas.

- IV. Elaboración de conclusiones: Mediante el análisis y procesamiento de la información recopilada tanto de fuentes bibliográficas como de los estudios realizados en campo, se llevará a cabo la elaboración de conclusiones. Este proceso se realizará en gabinete, con el propósito de recopilar y sintetizar los resultados obtenidos.

En primer lugar, se realizará un análisis detallado de los requisitos y limitaciones de la bomba de ariete. Se identificarán los criterios clave que deben considerarse para una instalación exitosa en campo, incluyendo factores como la altura de elevación, las condiciones de suministro de agua, entre otros.

Asimismo, se evaluarán las ventajas y desventajas asociadas a la implementación de la bomba de ariete, teniendo en cuenta aspectos como su bajo costo de operación y mantenimiento, su capacidad para funcionar sin requerir energía eléctrica y su idoneidad en entornos rurales o remotos donde no existe acceso a la red eléctrica convencional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción.

Una capacidad energética adecuada e infraestructuras óptimas constituyen las condiciones fundamentales para enfrentar los desafíos del agua.

Entre las infraestructuras que permiten el abastecimiento eficiente del agua se encuentran a los sistemas de bombeo que, gracias a sus componentes, entre ellos las bombas, desempeñan diversas funciones en una variedad de aplicaciones, tanto en entornos domésticos como industriales. Para su funcionamiento las bombas requieren una fuente de energía. Esto puede ser electricidad en el caso de bombas eléctricas, combustible en bombas de combustión interna, o energía hidráulica.

Es importante tomar medidas en todo el mundo para reducir el uso de energía fósil y promover el uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles para mitigar los efectos del cambio climático y proteger el medio ambiente.

El avance y la evolución del Ariete Hidráulico representan una contribución significativa a la búsqueda de un equilibrio entre el crecimiento económico, el bienestar social y la preservación y protección del medio ambiente a lo largo del tiempo. Por consiguiente, los estudios y mejoras tecnológicas en esta máquina se consideran de gran utilidad.

En este primer capítulo se desarrollará la base teórica para el análisis del ariete hidráulico, se estudiará el principio de funcionamiento y los parámetros para su instalación; el ariete necesita de una instalación completa en la que están todos sus componentes ajustados entre sí, por tal motivo se describirán los elementos para su instalación, desde la captación de fuente hasta el almacenamiento del fluido. Se detallarán los periodos en que se divide el ciclo de trabajo del ariete hidráulico, tipos constructivos de bombas de ariete que ofrecen algunos fabricantes.

Además, se describirán brevemente los sistemas de bombeo eléctrico y bombeo fotovoltaico, con el propósito de establecer una comparación con el bombeo mediante ariete hidráulico.

2.2. Sistema de bombeo.¹

2.2.1. Definición de sistema de bombeo.

Un sistema de bombeo es un conjunto de elementos que permiten el transporte de los fluidos a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los mismos, de forma que se cumplan las especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos.

2.2.2. Elementos típicos de un sistema de bombeo.

En un sistema típico, además de las tuberías que enlazan los puntos de origen y destino, son necesarios otros elementos. Algunos de ellos proporcionan la energía necesaria para el transporte: bombas, lugares de almacenamiento y depósitos. Otros son elementos de regulación y control: válvulas y equipos de medida.

Un sistema de bombeo típico consta de los siguientes elementos principales (Ver figura 2.1):

1. Bomba, motor: La bomba es el componente central del sistema y se encarga de impulsar el líquido. Las bombas pueden variar en tipo y tamaño según la aplicación. El motor es el componente que proporciona la energía necesaria para hacer funcionar la bomba. Puede ser eléctrico, en cuyo caso convierte la energía eléctrica en energía mecánica que impulsa la bomba, o puede ser de combustión interna, utilizando combustible para generar energía mecánica. La elección del tipo de motor depende de factores como la disponibilidad de energía, la eficiencia y las características del sistema de bombeo en particular.
2. Tuberías y conductos: El líquido se transporta a través de un sistema de tuberías o conductos desde la fuente (por ejemplo, un pozo, un tanque o un cuerpo de agua) hasta el lugar de destino (por ejemplo, una red de distribución, un sistema de riego o un proceso industrial).
3. Válvulas: Se utilizan para controlar el flujo de líquido en el sistema, permitiendo abrir o cerrar la circulación en diferentes tramos de las tuberías.
4. Filtros y trampas de sedimentos: En algunos casos, se incorporan filtros y trampas para eliminar impurezas y sedimentos del líquido antes de que entre en la bomba. Esto ayuda a proteger la bomba y a mantener un funcionamiento eficiente.

¹ Blanco E., Velarde S., y Fernández J. (1994). Sistemas de Bombeo. Universidad de Oviedo. P 1.

5. Controles y dispositivos de seguridad: Los sistemas de bombeo a menudo incluyen controles para operar y supervisar el funcionamiento de la bomba (accesorios como manómetros), así como dispositivos de seguridad que pueden apagar la bomba en caso de problemas como sobrecalentamiento o falta de líquido.

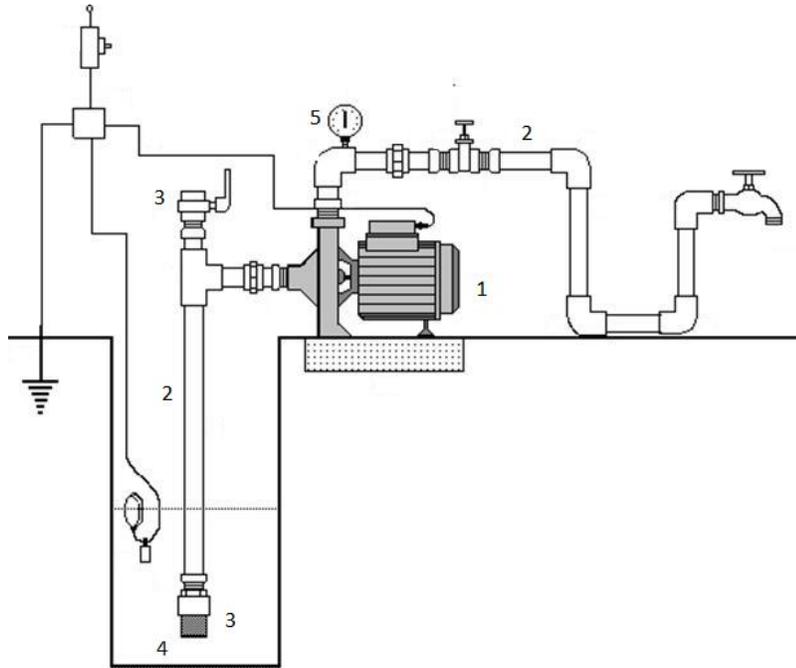


Figura N° 2.1. Elementos de un sistema de bombeo.
Fuente: Comercial Benoit.

2.3. Bombas de agua.

Una máquina de fluido es un sistema mecánico que intercambia energía con el fluido que está contenido o que circula a través de ella. Son máquinas de fluido las bombas, los ventiladores, los compresores, las turbinas hidráulicas, las turbinas de vapor y de gas, pero también los tornillos de Arquímedes o las ruedas hidráulicas.

Una bomba hidráulica o bomba de agua es una máquina generadora que trabaja con un fluido incompresible que transforma la energía mecánica en energía de fluido, poseen un motor que hace funcionar un sistema de aspiración que absorbe el fluido por una manguera conectada al cilindro de entrada y se encarga de impulsarlo a través de una manguera de salida.

La misión de una bomba es transferir energía a un líquido para permitir su transporte en una instalación. Esto conlleva normalmente un aumento de la presión a la salida de la bomba que puede relacionarse con el caudal que se esté transportando en forma de curva característica.

Esta curva característica es propia de cada bomba, y depende de su forma y principio de funcionamiento, de su tamaño, de la velocidad del accionamiento, etc., y también de algunas propiedades del fluido (aunque, sobre todo, de su viscosidad). (Heras S. 2011. p. 121)

La elección del tipo de bomba adecuada depende de una variedad de factores que deben ser considerados cuidadosamente para asegurar un rendimiento óptimo y eficiente en la aplicación deseada. Algunos de los principales factores que influyen en la selección del tipo de bomba son:

- Tipo de fluido y características del medio: Es fundamental conocer las propiedades del fluido que se va a bombear, como la viscosidad, temperatura, corrosividad y presencia de sólidos. Algunos fluidos pueden ser más adecuados para ciertos tipos de bombas que otros.
- Caudal y presión requeridos: El caudal (volumen de fluido que se debe bombear por unidad de tiempo) y la presión (energía necesaria para mover el fluido contra una resistencia) son consideraciones clave. La bomba seleccionada debe ser capaz de proporcionar el caudal y la presión necesarios para satisfacer los requisitos de la aplicación.
- Disponibilidad de energía: Si hay acceso a una fuente de energía eléctrica confiable, una electrobomba puede ser la opción más conveniente; caso contrario, se puede optar por otro tipo de bombas como motobombas, bombas solares o hidráulicas.
- Costo inicial y de mantenimiento: Se debe considerar tanto el costo inicial de adquisición como los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo. Algunas bombas pueden tener un costo inicial más bajo, pero pueden requerir más mantenimiento y consumir más energía a largo plazo.

2.3.1. Clasificación de las bombas de agua según la disponibilidad de energía.

Las bombas de agua pueden ser clasificadas de diversas formas; en este caso, se presentará una clasificación común basada en la disponibilidad de energía. En este sentido, se pueden categorizar en dos grupos principales:

2.3.1.1. Bombas de energía eléctrica.

Estas bombas funcionan utilizando electricidad como fuente de energía para accionar el motor que impulsa la bomba. Son ampliamente disponibles debido a que son las más

comunes en aplicaciones comerciales, industriales y domésticas, son fáciles de instalar en áreas con acceso a electricidad. La mayoría de las bombas sumergibles, centrífugas y de desplazamiento positivo son alimentadas por energía eléctrica.

Algunos puntos importantes sobre las bombas de energía eléctrica son:

1. **Funcionamiento:** Estas bombas son accionadas por motores eléctricos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica para mover el fluido. Los motores eléctricos pueden ser de corriente alterna (AC) o de corriente continua (DC), dependiendo de la aplicación y los requisitos de la bomba.

Las bombas eléctricas requieren una fuente constante de electricidad para funcionar. Esto puede ser problemático en áreas propensas a cortes de energía o en situaciones de emergencia donde la electricidad no está disponible. Las bombas eléctricas pueden experimentar fallos debido a problemas eléctricos, como sobrecargas, cortocircuitos o averías en el motor. Estos fallos pueden resultar en tiempos de inactividad no planificados y costosos para reparaciones o reemplazos.

En áreas remotas o rurales donde la infraestructura eléctrica es limitada o inexistente, el uso de bombas eléctricas puede no ser viable sin la instalación de costosas redes eléctricas o generadores de energía adicionales.

2. **Tipos de bombas:** Una amplia variedad de bombas pueden ser impulsadas por energía eléctrica, incluyendo bombas centrífugas, bombas de desplazamiento positivo (como bombas de pistón, bombas de diafragma y bombas de engranajes), bombas sumergibles, bombas de superficie y más. Cada tipo de bomba tiene sus propias características y aplicaciones específicas.

3. **Aplicaciones:** Se utilizan en una gran cantidad de aplicaciones, desde abastecimiento de agua potable en viviendas y edificios comerciales, riego agrícola, sistemas de calefacción y refrigeración, hasta procesos industriales como la circulación de líquidos en plantas químicas, petroquímicas y de tratamiento de aguas.

El costo operativo puede ser significativo, especialmente en aplicaciones industriales o comerciales donde se requiere un bombeo continuo a gran escala. Esto puede resultar en gastos operativos elevados a largo plazo.

4. **Eficiencia:** Los avances en tecnología de motores eléctricos y sistemas de control han mejorado significativamente la eficiencia energética de las bombas eléctricas en las últimas décadas.
5. **Mantenimiento:** Aunque las bombas de energía eléctrica son generalmente fiables y de bajo mantenimiento, los problemas eléctricos y mecánicos pueden requerir la intervención de técnicos especializados para su reparación. Esto puede resultar en costos adicionales y tiempos de inactividad prolongados. Es importante realizar inspecciones periódicas y llevar a cabo tareas de mantenimiento preventivo para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil de la bomba y el motor.
6. **Impacto ambiental:** La generación de electricidad puede tener un impacto negativo en el medio ambiente, dependiendo de la fuente de energía utilizada. Si la electricidad proviene de fuentes no renovables, como el carbón o el gas natural, puede contribuir a la contaminación del aire y el cambio climático.

Aunque las bombas de energía eléctrica ofrecen muchas ventajas, es importante considerar sus limitaciones y evaluar cuidadosamente si son la mejor opción para una aplicación específica. En algunos casos, puede ser necesario considerar otras alternativas para satisfacer las necesidades de bombeo de manera más eficiente y sostenible.

2.3.1.2. Bombas de energía no eléctrica.

Las bombas de energía no eléctrica son dispositivos que funcionan sin depender de la electricidad de la red eléctrica. Estas bombas utilizan diversas fuentes de energía para su funcionamiento, lo que las hace útiles en áreas donde la electricidad no está disponible o es poco confiable. Se subdividen en varias categorías como ser bombas manuales, bombas de combustión, bombas de energía hidráulica, bombas de energía fotovoltaica, entre otras. Algunas de ellas se describen a continuación:

- **Bombas de combustión:** Son un tipo especial de bomba que utiliza un motor de combustión interna, como un motor diésel o de gasolina, como fuente de energía para su funcionamiento. Estas bombas son particularmente útiles en situaciones donde la electricidad no está disponible o es poco confiable, pero se dispone de combustible para alimentar el motor. Algunos aspectos importantes sobre las bombas no eléctricas a combustión son:

1. **Funcionamiento:** Estas bombas están equipadas con un motor de combustión interna que acciona el mecanismo de bombeo. El motor es alimentado por combustible, como diésel o gasolina, que se quema dentro del motor para generar energía mecánica. Esta energía se transfiere al mecanismo de bombeo para impulsar el fluido a través del sistema.
2. **Aplicaciones:** Son utilizadas en una variedad de aplicaciones donde se requiere un bombeo de alta potencia y donde la electricidad no es una opción viable. Esto puede incluir el drenaje de aguas residuales en áreas remotas o rurales, el bombeo de agua en zonas de construcción o excavación, y el suministro de agua en aplicaciones industriales donde se necesita una gran cantidad de agua a alta presión.
Como se mencionó anteriormente las bombas no eléctricas a combustión dependen del suministro continuo de combustible, como diésel o gasolina, para su funcionamiento. Esto puede ser problemático en situaciones donde el suministro de combustible es limitado o inestable, especialmente en áreas remotas o en casos de emergencia donde el acceso al combustible puede ser difícil.
3. **Portabilidad y versatilidad:** Una de las ventajas de las bombas no eléctricas a combustión es su portabilidad y capacidad de operación independiente de la red eléctrica. Estas bombas suelen ser montadas sobre plataformas o remolques, lo que facilita su transporte y despliegue en diferentes ubicaciones según sea necesario.
4. **Seguridad:** El manejo de combustibles inflamables presenta riesgos de seguridad, especialmente en entornos donde hay riesgo de explosiones o incendios. Es importante seguir protocolos de seguridad adecuados y tomar precauciones adicionales al operar bombas no eléctricas a combustión para minimizar el riesgo de accidentes y lesiones.
5. **Potencia y rendimiento:** Los motores de combustión interna utilizados en estas bombas suelen ser de alta potencia y ofrecen un rendimiento confiable y robusto en una variedad de condiciones. Esto las hace ideales para aplicaciones que requieren un bombeo continuo y eficiente durante largos períodos de tiempo.
6. **Ruido y vibraciones:** Los motores de combustión interna suelen ser ruidosos y generan vibraciones significativas durante su funcionamiento. Esto puede ser

problemático en áreas sensibles al ruido o en entornos donde se requiere un ambiente tranquilo, como en aplicaciones residenciales o cercanas a zonas urbanas.

7. **Emisiones contaminantes:** Los motores de combustión interna emiten gases de escape que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana. Estas emisiones incluyen gases como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas nocivas, que contribuyen a la contaminación atmosférica y al cambio climático. El manejo adecuado de las emisiones y el cumplimiento de las regulaciones ambientales son aspectos importantes a considerar con este tipo de bombas.
 8. **Mantenimiento:** Al igual que con cualquier equipo que utilice un motor de combustión interna, las bombas no eléctricas a combustión requieren mantenimiento regular para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil. Esto puede incluir cambios de aceite, filtros de aire y combustible, y ajustes periódicos del motor para garantizar un rendimiento confiable. Los costos de mantenimiento pueden ser significativos, especialmente en aplicaciones de uso intensivo o en entornos adversos donde el desgaste del equipo es mayor.
- **Bombas de energía hidráulica:** Son dispositivos que utilizan la presión del agua como fuente de energía para su funcionamiento. Estas bombas son una alternativa a las bombas eléctricas y son especialmente útiles en áreas donde la electricidad no está disponible o es poco confiable. Algunos aspectos importantes sobre las bombas no eléctricas de energía hidráulica son:
 1. **Funcionamiento:** Estas bombas utilizan la presión del agua, ya sea de una fuente natural como un río o arroyo, o de un sistema hidráulico artificial, para impulsar el fluido a través del sistema de bombeo. El agua actúa como fuente de energía para mover el líquido sin la necesidad de un motor eléctrico.

Estas bombas dependen de la disponibilidad de una fuente de agua para funcionar. Si la fuente de agua se seca o se contamina, la bomba puede volverse inutilizable.
 2. **Tipos:** Hay varios tipos de bombas hidráulicas, incluyendo bombas de ariete, bombas de noria, bombas de pistón y bombas de tornillo. Cada tipo tiene sus propias características y aplicaciones específicas. Por ejemplo, las bombas de ariete son adecuadas para elevar agua a grandes alturas, mientras que las bombas de noria son ideales para mover grandes volúmenes de agua a baja altura.

3. **Aplicaciones:** Se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde sistemas de riego agrícola y suministro de agua en áreas rurales hasta sistemas de drenaje y bombeo en entornos industriales y comerciales. Son especialmente útiles en áreas donde hay una fuente de agua disponible y se necesita un bombeo constante y confiable.
4. **Portabilidad y versatilidad:** Una de las ventajas de las bombas hidráulicas es su portabilidad y capacidad de operar independientemente de la red eléctrica. Son dispositivos simples que pueden ser transportados fácilmente y utilizados en diferentes ubicaciones según sea necesario.
5. **Mantenimiento:** Las bombas hidráulicas son generalmente de bajo mantenimiento, pero es importante realizar inspecciones periódicas y llevar a cabo tareas de mantenimiento preventivo para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil. Esto puede incluir la limpieza de filtros, la lubricación de partes móviles y la inspección de sellos y juntas para detectar posibles fugas.
- **Bombas de energía fotovoltaica:** Son dispositivos que utilizan paneles solares para convertir la luz solar en electricidad, que luego se utiliza para alimentar el funcionamiento de la bomba. Estas bombas son una alternativa sostenible y eficiente a las bombas eléctricas tradicionales, ya que aprovechan una fuente de energía renovable y limpia: la luz solar. A continuación, se mencionan algunos aspectos importantes sobre las bombas de energía fotovoltaica:
 1. **Funcionamiento:** Funcionan mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos para capturar la energía del sol y convertirla en electricidad. Esta electricidad se utiliza para alimentar el motor de la bomba, que impulsa el fluido a través del sistema de bombeo. La cantidad de electricidad generada depende de la intensidad y la duración de la luz solar, así como de la eficiencia de los paneles solares.

En días nublados, con poca luz solar o durante la noche, la producción de electricidad de los paneles solares puede disminuir significativamente o detenerse por completo. Esto puede afectar la capacidad de la bomba para operar de manera constante y confiable, especialmente en regiones con condiciones climáticas variables o en estaciones con menos horas de luz solar.
 2. **Aplicaciones:** Se utilizan en una variedad de aplicaciones donde se necesita un bombeo de agua y donde la electricidad no está disponible o es costosa de instalar.

Esto puede incluir sistemas de riego agrícola, suministro de agua potable en áreas rurales o remotas, bombeo de agua para ganado, drenaje de agua en áreas bajas y bombeo de agua para fines industriales o comerciales.

3. Sostenibilidad y bajo mantenimiento: Una de las principales ventajas de las bombas de energía fotovoltaica es su sostenibilidad y bajo impacto ambiental. Utilizan una fuente de energía renovable y limpia, la luz solar, para su funcionamiento, lo que reduce la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, son dispositivos de bajo mantenimiento, ya que no tienen partes móviles que requieran lubricación o ajustes regulares.
4. Costos iniciales y de instalación: Aunque los costos operativos a largo plazo de las bombas de energía fotovoltaica son generalmente bajos, los costos iniciales de instalación pueden ser relativamente altos debido al precio de los paneles solares y otros componentes del sistema, como el controlador de carga y las baterías de almacenamiento. Además, el diseño e instalación adecuados del sistema pueden requerir la asistencia de profesionales capacitados, lo que puede aumentar aún más los costos.
5. Vulnerabilidad a vandalismo y robo: Los paneles solares y otros componentes del sistema pueden ser vulnerables al vandalismo y robo, especialmente si se instalan en áreas remotas o poco vigiladas. La protección adecuada del sistema, como la instalación de cercas de seguridad o sistemas de vigilancia, puede ser necesaria para evitar daños o pérdidas debido a actividades delictivas.

El contenido de la tabla 2.1, se centra en comparar aspectos clave de las bombas según la fuente de energía utilizada para su funcionamiento.

Tabla N° 2.1. Comparación de aspectos importantes de las bombas según su fuente de suministro de energía.

Característica	Bomba de Energía Eléctrica	Bomba de Combustión	Bomba Hidráulica (bomba de ariete)	Bomba de energía Fotovoltaica
Fuente de energía	Electricidad de la red eléctrica o generadores eléctricos	Combustibles fósiles (gasolina, diésel)	Energía hidráulica (presión del agua)	Energía solar (paneles fotovoltaicos)

Continuación de la tabla 2.1.				
Característica	Bomba de Energía Eléctrica	Bomba de Combustión	Bomba Hidráulica (bomba de ariete)	Bomba de energía Fotovoltaica
Costos iniciales	Moderados a altos, dependiendo del tipo y tamaño de la bomba, así como de los costos de instalación eléctrica	Moderados a altos, dependiendo del tipo y tamaño de la bomba, así como del precio del motor de combustión y los componentes asociados	Bajos a moderados, dependiendo del tipo y tamaño de la bomba, así como de los costos de instalación hidráulica	Moderados a altos, dependiendo del tamaño del sistema fotovoltaico y los costos de instalación
Costos de operación	Moderados a altos, dependiendo de las tarifas eléctricas y el consumo	Moderados a altos, dependiendo del precio del combustible	Bajos a moderados, dependiendo del caudal disponible	Bajos, la energía solar es gratuita
Mantenimiento	Requiere mantenimiento regular, como inspecciones y reparaciones eléctricas	Requiere mantenimiento regular del motor de combustión, cambios de aceite, filtros, etc.	Generalmente de bajo mantenimiento, inspecciones periódicas	Requiere mantenimiento mínimo, como limpieza de paneles solares e inspecciones en la bomba
Impacto ambiental	Emisiones de CO ₂ y otros contaminantes durante la generación de electricidad	Emisiones de gases de escape y contaminación asociada con el uso de combustibles fósiles	Bajo impacto ambiental, aprovecha una fuente de energía renovable	Bajo impacto ambiental, utiliza energía solar limpia y renovable
Flexibilidad y portabilidad	Limitada, dependiente de la infraestructura eléctrica y la ubicación de los puntos de acceso	Mayor, puede ser transportada fácilmente a diversas ubicaciones, dependiendo del suministro de combustible	Limitada, generalmente instalada en ubicaciones fijas cerca de fuentes de agua	Limitada, puede ser instalada en ubicaciones remotas, pero la bomba depende de la ubicación de la infraestructura de suministro.

Continuación de la tabla 2.1.				
Característica	Bomba de Energía Eléctrica	Bomba de Combustión	Bomba Hidráulica (bomba de ariete)	Bomba de energía Fotovoltaica
Autonomía energética	Dependiente de la red eléctrica o de la capacidad de los generadores eléctricos	Limitada por la capacidad del tanque de combustible y el suministro de combustible	Limitada por la disponibilidad de agua	Limitada por la disponibilidad de luz solar

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo A se muestran las curvas de rendimiento y cuadros de capacidad de bombeo de algunas alternativas de bombas eléctricas y no eléctricas en el mercado.

2.4. Bomba de ariete.

2.4.1. ¿Qué es una bomba de ariete?²

La bomba de ariete es un dispositivo diseñado para proporcionar un suministro continuo de agua utilizando energía renovable, sin depender de fuentes de energía convencionales. Funciona aprovechando el fenómeno hidráulico conocido como "Golpe de Ariete", convirtiendo la energía cinética del agua en energía de presión. Utiliza la energía de la caída del agua para elevar parte del caudal a una altura mayor que la de su fuente de alimentación, de forma automática y continua, sin requerir electricidad ni combustibles fósiles.

Estos equipos destacan por su fácil operación, regulación, mantenimiento y solución de fallas. Son fabricadas con materiales resistentes que garantizan una larga vida útil. Son ideales para aplicaciones en sistemas de agua potable, riego y otros líquidos similares, siempre que estén libres de sustancias abrasivas.

2.4.2. Golpe de ariete.³

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico que ocurre cuando se interrumpe abruptamente el flujo de agua en una tubería. Este fenómeno se produce debido a la inercia del agua en movimiento y a la elasticidad de la propia tubería.

² Gutierrez G. (2022). Bombas Hidroaxon.

³ Mataix C. (1986). Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. P 312.

Cuando se cierra una válvula o se detiene el flujo de agua en una tubería de manera brusca, el agua en movimiento genera una presión adicional en el interior de la tubería, causando un aumento repentino de la presión. Esta presión adicional viaja de regreso a lo largo de la tubería en forma de onda de choque, similar al efecto de un látigo. Esta onda de choque puede provocar un aumento brusco de la presión en el sistema, que puede ser varias veces mayor que la presión normal de funcionamiento.

Para el estudio de este fenómeno tendremos que abandonar las dos hipótesis que normalmente se usan: fluido incompresible (el agua y otros líquidos no cambian su volumen bajo presión) y régimen permanente (las condiciones de flujo en el sistema hidráulico son constantes y no cambian con el tiempo), debido a que el golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable (ocurre durante un período de tiempo limitado y las condiciones de flujo varían significativamente durante este período); esto hace que la tubería ya no sea rígida y el líquido es compresible.

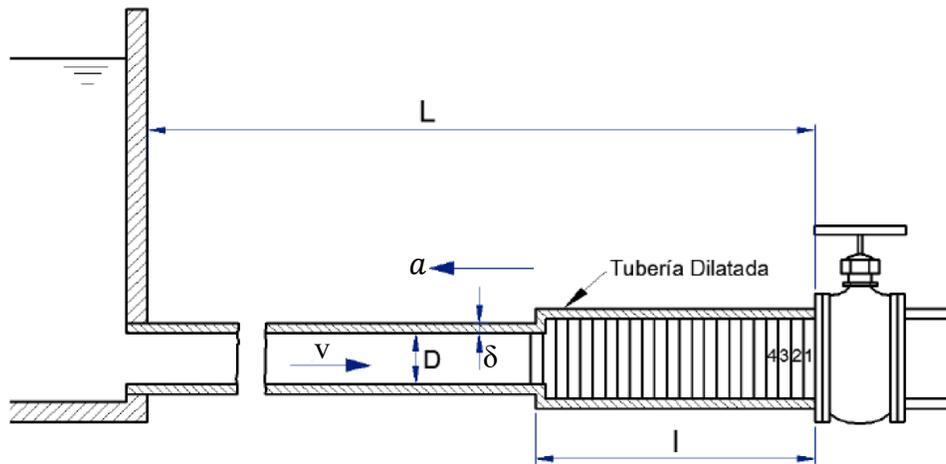


Figura N° 2.2. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.
Fuente: Mataix C., 1986.

La figura 2.2. representa una tubería de longitud “L”, espesor “ δ ” y diámetro interior “D” (“a” es la velocidad de propagación de la onda y “v” la velocidad del fluido) por la que circula agua proveniente de un embalse y que termina en su extremo derecho en una válvula. Si se cierra esta rápidamente, en virtud del principio de conservación de energía, al disminuir la energía cinética, esta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar esta última: se ha producido una sobrepresión o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o un golpe de ariete negativo.

Al cerrarse por completo instantáneamente la válvula de la figura 2.2. y si dividimos imaginariamente todo el líquido que llena la tubería en rodajas, como 1, 2, 3 y 4, se quedará primero en reposo la rodaja 1 y a continuación la 2, 3, 4, etc.; necesitando un cierto tiempo. Es decir, en la válvula se ha originado una onda de presión que se propaga con velocidad “ a ”, la cual en el instante considerado tiene dirección contraria a la velocidad del fluido: se ha creado una onda elástica o sea una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el embalse, vuelve a la válvula, de nuevo al embalse, y así sucesivamente; originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda. Siendo “ a ” la velocidad de la onda y “ L ” la longitud de la tubería, el tiempo que tarda la onda en recorrer una vez la distancia entre la válvula y el embalse es $t_0 = L/a$. Al cabo de un tiempo $T = 4 t_0 = 4L/a$ el ciclo se repite.

Si consideramos una serie de acontecimientos en la tubería durante un periodo $T = 4L/a$ se tiene:

1. No hay perturbación. Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad v del embalse a la válvula. Diámetro de la tubería normal.

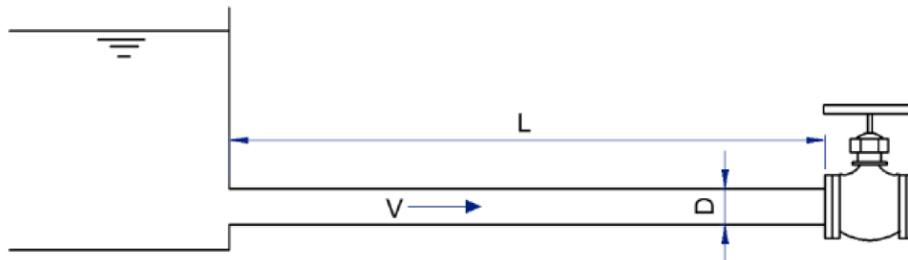


Figura N° 2.3. No hay perturbaciones.

Fuente: Mataix C., 1986.

2. Tiempo 0. La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente, en toda la tubería.

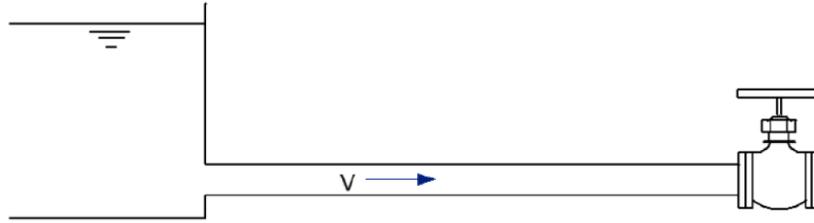


Figura N° 2.4. Tiempo 0 en que la válvula queda totalmente cerrada.
Fuente: Mataix C., 1986.

3. Tiempo $t_0/2 = \frac{1}{2} \frac{L}{a}$. La onda de presión se ha propagado hacia el embalse con celeridad “ a ” y el frente de onda ha llegado a la mitad de la tubería. Mitad derecha de la tubería dilatada por la sobrepresión. Mitad izquierda, diámetro normal. En esta mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad “ v ” hacia la válvula. En la mitad derecha, $v = 0$.

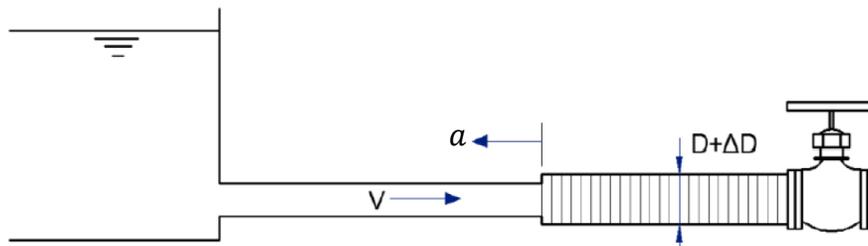


Figura N° 2.5. Tiempo $\frac{L/2}{a}$.
Fuente: Mataix C., 1986.

4. Tiempo $t_0 = L/a$. La onda de presión ha llegado al embalse. En toda la tubería el líquido está en reposo, $v = 0$, pero no en equilibrio. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se expande, el agua en la tubería comienza a moverse con velocidad “ v ”, pero dirigida en sentido contrario al de la figura 2.3. El líquido empieza a ponerse en movimiento comenzando, por decirlo así, por las rodajas contiguas al estanque.

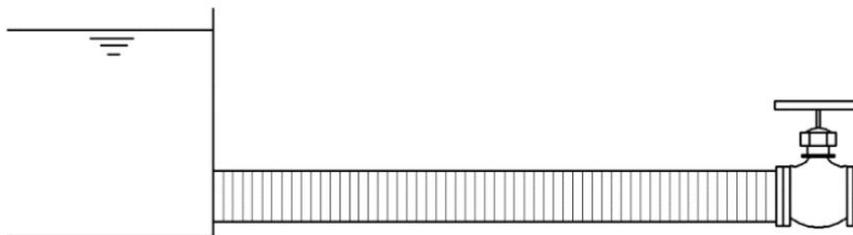


Figura N° 2.6. Tiempo $\frac{L}{a}$.
Fuente: Mataix C., 1986.

5. Tiempo $3/2t_0 = 3/2 \frac{L}{a}$. La mitad izquierda de la tubería se ha contraído a su diámetro normal. La onda sigue propagándose hacia la derecha con velocidad “ a ”. En la mitad izquierda de la tubería el fluido circula con la velocidad “ v ”.

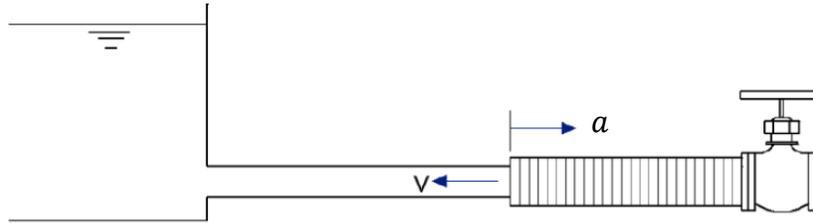


Figura N° 2.7. Tiempo $\frac{3/2L}{a}$.
Fuente: Mataix C, 1986.

6. Tiempo $2t_0 = \frac{2L}{a}$. Diámetro de toda la tubería normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el embalse con velocidad “ v ”; es decir, en dirección contraria a la de las figuras 2.3, 2.4, 2.5. No hay sobrepresión en ninguna parte de la tubería; pero por la inercia la presión continúa disminuyendo, la onda elástica se sigue propagando, ahora con depresión desde la válvula hacia el embalse con la velocidad “ a ”: el diámetro de la tubería ira disminuyendo por debajo de su diámetro normal.

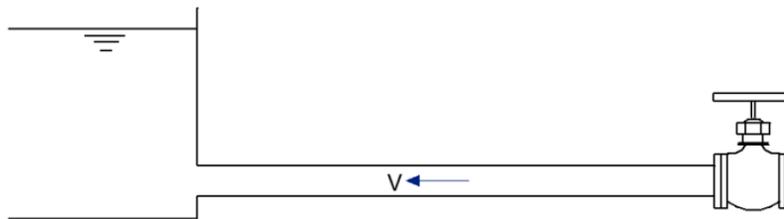


Figura N° 2.8. Tiempo $\frac{2L}{a}$.
Fuente: Mataix C, 1986.

7. Tiempo $5/2t_0 = \frac{5}{2} \frac{L}{a}$. La depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad derecha de la tubería contiene agua en reposo y a una presión debajo de lo normal. El diámetro de la tubería en esta mitad es inferior al normal.

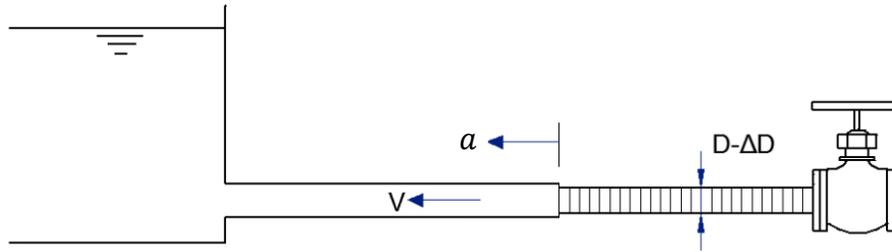


Figura N° 2.9. Tiempo $\frac{5L}{a}$.
Fuente: Mataix C, 1986.

8. Tiempo $3t_0 = 3\frac{L}{a}$. El agua en toda la tubería esta en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad “v” dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior a la normal.



Figura N° 2.10. Tiempo $\frac{3L}{a}$.
Fuente: Mataix C., 1986.

9. Tiempo $7/2t_0 = \frac{7}{2}\frac{L}{a}$. En la mitad izquierda de la tubería el fluido esta en movimiento con velocidad “v” hacia la válvula. En la mitad derecha el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El de la mitad derecha menor que el normal; “a” y “v” tienen el mismo sentido.

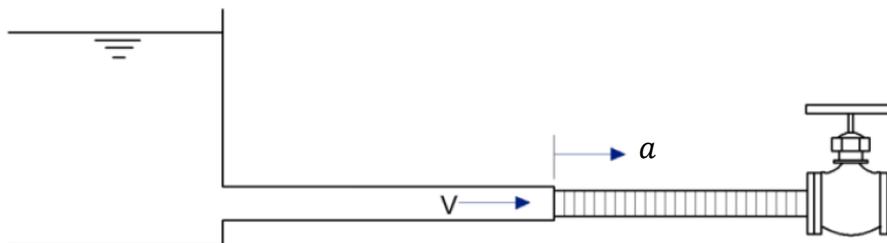


Figura N° 2.11. Tiempo $\frac{7L}{a}$.
Fuente: Mataix C., 1986.

10. Tiempo $4t_0 = 4\frac{L}{a}$. Diámetro de la tubería normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad “v” hacia la válvula. Todo igual que en el tiempo 0. Luego el periodo de este movimiento es: $T = 4 t_0 = 4 L/a$

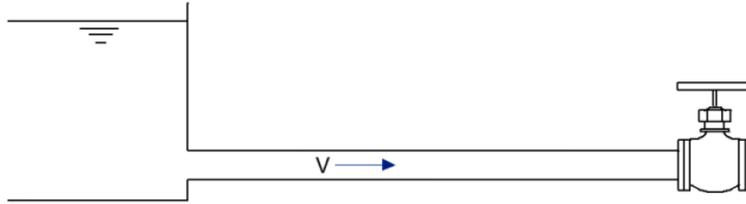


Figura N° 2.12. Tiempo $\frac{4L}{a} = T$ (Periodo).
Fuente: Mataix C., 1986.

Teóricamente este movimiento oscilatorio continuaría indefinidamente. Prácticamente la deformación de la tubería y la viscosidad del líquido disipa energía y las oscilaciones se amortiguan⁴.

2.4.3. Efecto del golpe de ariete en la estructura del ariete hidráulico.⁵

El ariete hidráulico fue diseñado para aprovechar el efecto de golpe de ariete para elevar el agua hasta cierta altura. Como se mencionaba anteriormente, el golpe de ariete sucede cuando el flujo se detiene repentinamente, se crea una alta presión en el agua como un martillo golpeando el interior de la tubería. El martilleo que se produce en la tubería fue propuesto por un científico ruso, Prof. Jukowski, en 1899. Otro científico ruso, A. M. Wutlerow, hizo un sistema experimental para observar el golpe de ariete en el funcionamiento de arietes hidráulicos; su instrumento experimental era muy simple, como se muestra en la Figura 2.13.

⁴ Mataix C. (1986). Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. P 315.

⁵ Ma Chi. (2002). Hydraulic Ram Handbook. Borda. p 66.

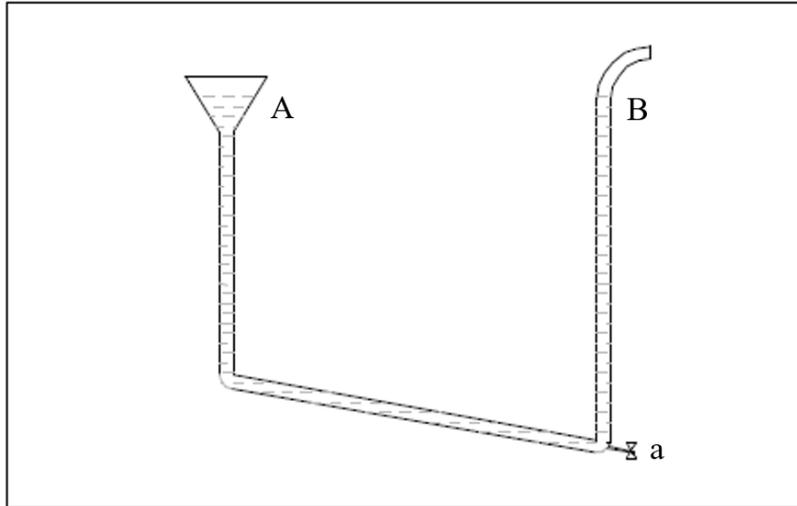


Figura N° 2.13. Instrumento experimental del efecto del golpe de ariete.
Fuente: Ma Chi, 2002.

Para el experimento se necesitaba un pedazo de tubo de vidrio, doblado hasta darle la forma que se muestra en la figura 2.13. y tiene un pequeño orificio en el punto “a”. Los únicos pasos del experimento fueron los siguientes:

- Cerrar el pequeño agujero con un dedo.
- Verter el agua en el tubo de vidrio hasta que el agua en el punto “A” y el punto “B” están al mismo nivel.
- Retirar el dedo para permitir que el agua salga por el orificio “a”. El agua comienza a fluir.
- Cuando el agujero se cierra repentinamente, el nivel del agua en la posición “A” aumentará más alta que la posición “B” hasta que el agua salga del tubo.

El experimento descrito anteriormente es una simulación simplificada de cómo el golpe de ariete ocurre en el sistema de ariete hidráulico. Aunque el experimento y la operación real del ariete hidráulico comparten el mismo principio básico de interrumpir el flujo de agua para generar el golpe de ariete, difieren en el mecanismo específico utilizado para detener el flujo de agua: manualmente en el experimento y automáticamente mediante la válvula de impulso en el sistema de ariete hidráulico.

2.4.4. Historia.⁶

Desde que el hombre empezó a transportar agua por tuberías se encontró con un problema al cerrar el paso, rápidamente aguas abajo en el interior de la tubería se producía un sonido de golpe de martillo y las tuberías se deterioraban rápidamente o reventaban, de un problema y el ingenio surgió una maquina sencilla para elevar agua “la bomba de ariete hidráulico”.

Se ha discrepado mucho sobre el verdadero creador empírico de esta bomba, pero unas de las crónicas más aceptadas son en la cual se le atribuye la invención al inglés John Whitehurst en el año 1772, quien desarrolló su ingenio para construir un equipo con un principio de funcionamiento novedoso para la época: accionar manualmente un grifo conectado con una tubería a un depósito, en un nivel superior, para así aprovechar el fenómeno físico conocido como golpe de ariete, el cual permitía elevar el líquido a un tanque de almacenamiento colocado a una altura mayor.

La primera bomba de ariete como se conoce hoy fue inventada en 1796 por el francés Joseph Michel Montgolfier (más conocido como co-inventor del globo aerostático), concibió un ariete automático que en principio fue similar a los contemporáneos el cual denominó “belier hydraulique” (ariete hidráulico, traducido al español). Este equipo radicaba en que ya no era necesario una fuerza externa para abrir la válvula de impulsión, sino que con la misma energía cinética que genera el agua en movimiento se encargaba de realizar esta tarea.

El ariete patentado por Joseph Montgolfier fue mejorado en 1816 por su hijo Pierre François Montgolfier, quien diseñó una válvula para introducir el aire en la cámara, mejorando así su rendimiento y bombeando agua a mayores alturas.

Desde 1839, los científicos en Europa habían investigado el golpe de ariete como un fenómeno que aparece en las tuberías de agua. En 1899, un científico ruso fue el primero en proponer la teoría del golpe de ariete, que fue la teoría básica para el desarrollo de los arietes hidráulicos.

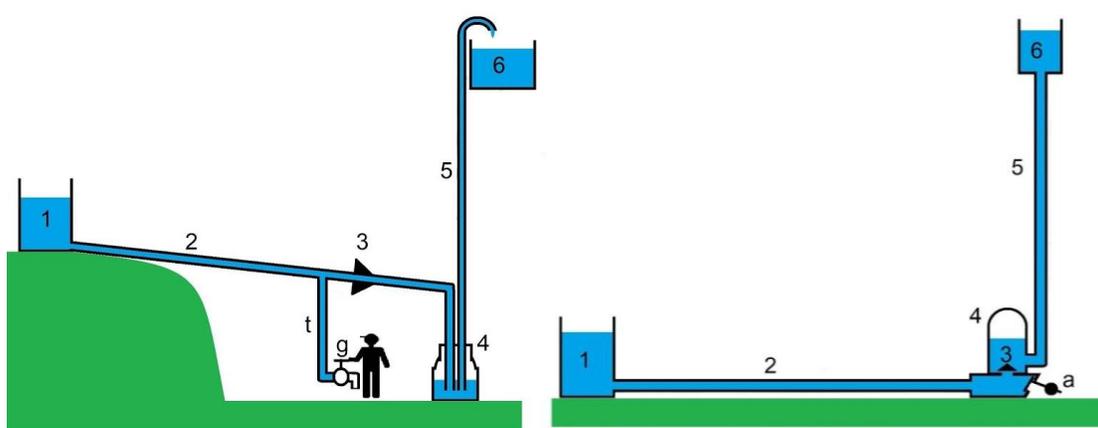
El ariete de 1907 fue sustituido por un diseño mejorado, un "ariete sano". Este ariete desarrollado por la empresa de Núremberg "Pfister and Langhanss" logró una mayor

⁶ Ma Chi. (2002). Hydraulic Ram Handbook. Borda. P 64

capacidad de transporte. El ariete sano fue entregado en 1929 y montado por Christof Schirl de Eschenau (municipio de Eckental, Alemania).

A partir del siglo XIX universidades en los Estados Unidos, tales como O'Brien y Gasline en California y Lansford y Dugan en Illinois, llevaron a cabo investigaciones y experimentos en los arietes hidráulicos. En muchos otros países (en la antigua Unión Soviética, Rumania, Japón, etc) se interesaron por el ariete hidráulico, su aplicación y desarrollo.

Existen infinidad de fabricantes que se ocuparon de añadir bondades al equipo que pronto tuvo una amplia difusión por todo el mundo.



Esquema de funcionamiento del ariete hidráulico ideado por John Whitehurst:

1. Depósito de alimentación o tanque de entrega
2. Tubería de alimentación
3. Válvula de elevación (principal)
4. Cámara de aire
5. Tubería de elevación
6. Depósito de elevación o tanque elevado

Esquema del ariete hidráulico ideado por Joseph Michael Montgolfier, construido con el mismo principio de funcionamiento de los equipos actuales.

- a. Válvula de impacto o ariete
- g. Válvula o grifo
- t. Tubería auxiliar

Figura N° 2.14. Primeros esquemas de funcionamiento del ariete hidráulico.

Fuente: Pérez M., 2018.

2.5. Configuración típica del ariete hidráulico.

La configuración de cada ariete hidráulico varía dependiendo de su diseño y fabricación, sin embargo, el principio del funcionamiento sigue siendo el mismo.

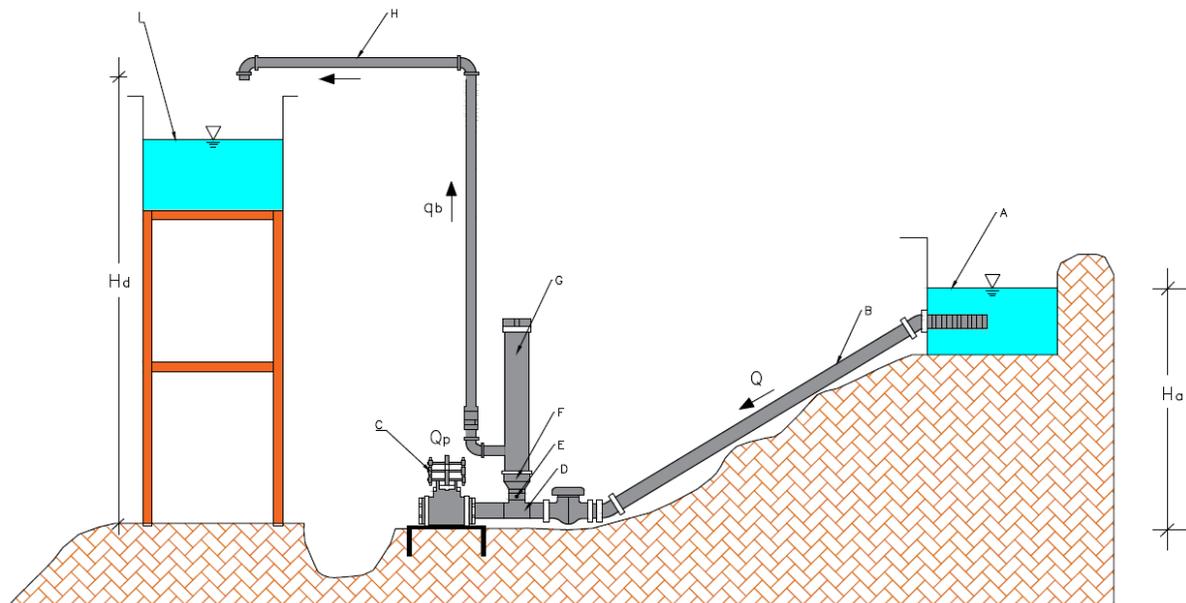


Figura N° 2.15. Configuración típica del ariete hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

H_d : Altura de alimentación, desnivel entre la toma de agua y el punto más bajo del ariete.

H_a : Altura de descarga, altura a la cual se eleva el agua, tomando como referencia el ariete.

A: Tanque de abastecimiento.

B: Tubería de alimentación, suministro o impulsión.

C: Válvula de impulsión.

D: Caja de válvulas.

E: Válvula de aire.

F: Válvula de retención.

G: Cámara de aire.

H: Tubería de descarga.

I: Depósito de descarga.

Q: Caudal de suministro.

Q_p : Caudal perdido.

q_b : Caudal bombeado.

En la figura 2.16 se muestra un esquema de instalación de un ariete hidráulico, a partir de esta se explicará el concepto de sus componentes.

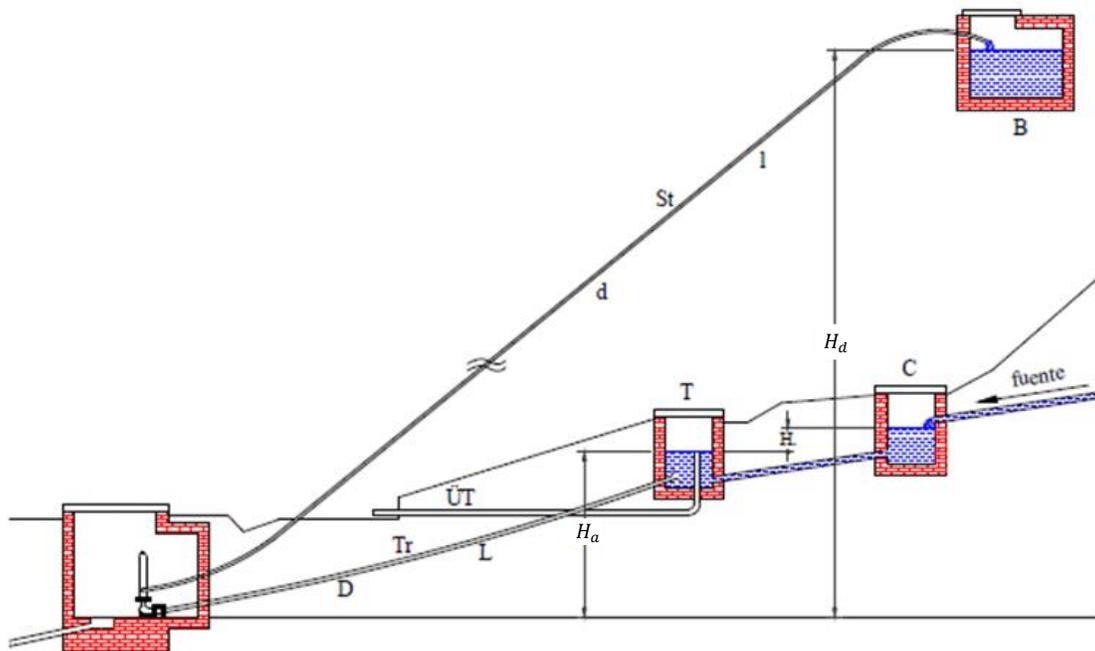


Figura N° 2.16. Esquema de instalación de un ariete hidráulico.
Fuente: Ayala M., 2006.

Donde:

C: Colector de Fuente

T: Tanque de abastecimiento

B: Tanque elevado

L: Longitud del conducto de impulsión

l: Longitud del conducto vertical

ÚT: Canal de derrame T

Tr: Conducto de impulsión

D: Diámetro de *Tr*

H_a: Altura de impulsión

H_a: Altura de descarga

S_t: Conducto vertical

d: Diámetro de *S_t*

2.5.1. Fuente de agua.

Una fuente de agua es cualquier lugar donde el agua fluye o se encuentra naturalmente disponible en la superficie de la Tierra o en el subsuelo. Estas fuentes pueden variar en tamaño, forma y tipo, y son fundamentales para la vida en el planeta, ya que proporcionan agua dulce para el consumo humano, la agricultura, la industria, la vida silvestre y otros usos. Estas pueden clasificarse en fuentes de agua superficiales y fuentes de agua subterránea.

Es importante distinguir entre estratos impermeables y estratos acuíferos. Un estrato acuífero debe considerarse como un depósito, mientras que el estrato impermeable es el suelo de dicho colector.

La formación de los estratos dentro de la tierra raramente se produce en forma uniforme, sino más bien por estrías, como una torta de mármol cortada como se muestra en la figura 2.17. (Ayala M. 2006. p 12).

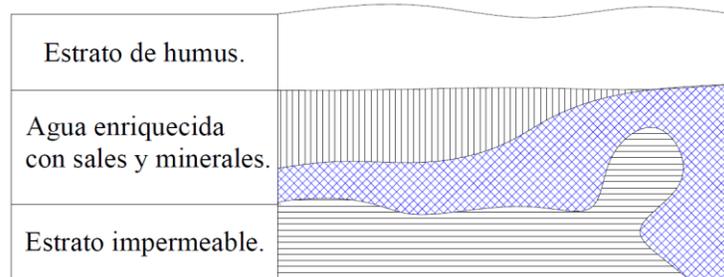


Figura N° 2.17. Formación de estratos.
Fuente: Ayala M., 2006.

Uno de los aspectos cruciales en el diseño e instalación de un ariete hidráulico radica en la identificación de las fuentes de agua disponibles y la cuantificación precisa de la cantidad de agua disponible. La viabilidad y eficacia del ariete están estrechamente ligadas a la cantidad de agua que puede ser suministrada para su funcionamiento. Por lo tanto, es imperativo determinar con precisión la cantidad de agua disponible y cómo esta se correlaciona con las necesidades específicas del ariete en cuestión. Este proceso de evaluación permitirá determinar la capacidad de suministro de agua, lo cual es fundamental para el funcionamiento adecuado del ariete, especialmente en términos de su capacidad para elevar el agua cuesta arriba.

2.5.2. Colector de fuente.

El colector de fuente es un pozo que colecta el agua de la fuente y se deja que repose. Su función es captar el agua de manera eficiente y proporcionar un flujo constante y adecuado al ariete, garantizando así su correcto funcionamiento.

Debe ubicarse estratégicamente en un lugar donde haya una fuente de agua constante y suficiente para alimentar el ariete, el tamaño del colector debe ser suficiente para captar y transportar el caudal de agua necesario para el funcionamiento del ariete, teniendo en cuenta factores como la demanda de agua, la altura de caída y la capacidad del ariete, es importante

incorporar sistemas de filtración y protección en el colector para evitar la entrada de sedimentos, materiales sólidos u otros contaminantes que puedan obstruir o dañar el ariete. Esto puede incluir el uso de rejillas, filtros o trampas de sedimentos; se fabrican en plástico u hormigón con piezas ajustadas a las condiciones del terreno y al caudal. Se construyen a partir de especificaciones y experiencia práctica.

2.5.3. Tanque de abastecimiento.

El tanque de abastecimiento está montado a continuación del colector de fuente. Este depósito es el encargado de recibir el agua del colector y suministrarla hacia el ariete por medio de la tubería de impulsión asegurando un suministro constante y estable para el funcionamiento óptimo del dispositivo. Las dimensiones del tanque pueden ajustarse según el caudal de agua requerido y su diseño incluye un rebosadero que garantiza un nivel de agua constante en el depósito.

El tanque de abastecimiento está equipado con una salida diseñada para conectar la tubería de impulsión del ariete, esta última se sitúa típicamente de 10 a 15 centímetros por encima del suelo para facilitar su acceso y mantenimiento (permitir limpiezas periódicas y facilitar reparaciones eventuales).

El tanque de abastecimiento tendrá que proporcionar agua a una altura H_a por encima del nivel al que se encuentre la bomba de ariete. Esta altura H_a es importante porque proporciona la energía potencial necesaria para impulsar el agua a una altura determinada.

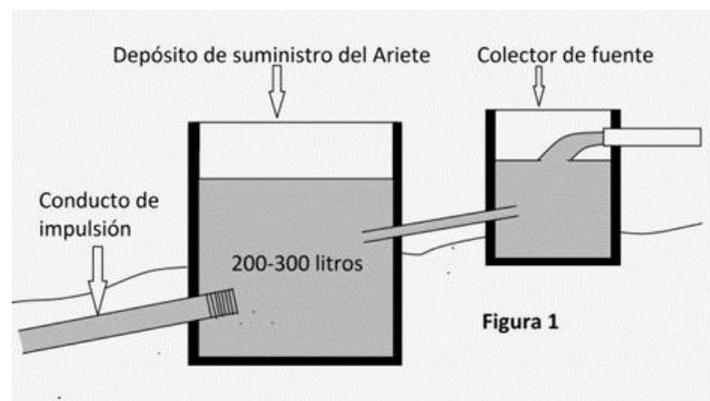


Figura N° 2.18. Ubicación del colector de fuente y tanque de abastecimiento
Fuente: Martínez D., 2013.

2.5.4. Tubería de alimentación o impulsión.

Conducto rígido que une el tanque de abastecimiento con la bomba de ariete. Por esta tubería se propagan varias ondas de choque debido a que el fluido adquiere velocidad hasta llegar a la bomba de ariete, por lo que se recomienda sea de acero por ofrecer poca resistencia al rozamiento y ser más rígido.

Si consideramos que el flujo de agua en la tubería de alimentación es el impulsor del mecanismo del Ariete, la altura de impulsión es el motor del sistema. A medida que aumenta la diferencia de altura, se potencia la eficiencia del dispositivo. Por consiguiente, se debe procurar la máxima caída disponible para garantizar el desempeño óptimo de la configuración. “ H_a ” guarda una estrecha relación con la altura de descarga “ H_d ”. Conociendo a que altura se desea bombear el agua se puede calcular el desnivel mínimo requerido para que la instalación sea rentable.

Cada instalación está sometida a las condiciones del terreno, es única.

2.5.5. Bomba de ariete.

Es el componente central del sistema. La bomba de ariete utiliza la energía hidráulica para impulsar una pequeña porción de agua a una elevación mayor. A continuación, se mencionan y describen cada una de las partes que la componen:

2.5.5.1. Cuerpo del ariete.

En el cuerpo del ariete se colocan los componentes internos como son las válvulas de impulso, válvula de descarga y cámara de aire; el cuerpo debe soportar las presiones internas que se producen por el efecto del golpe de ariete.

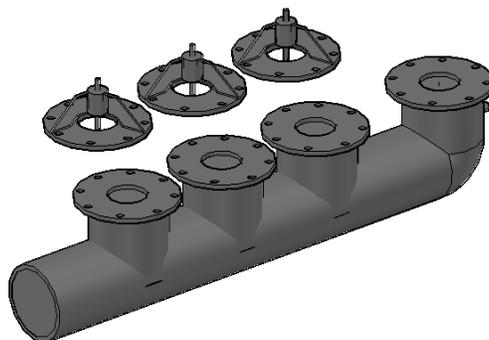


Figura N° 2.19. Cuerpo del ariete hidráulico.
Fuente: Chero A., 2018.

2.5.5.2. Válvula de control.

La válvula de control permite ajustar la cantidad de fluido que pasa a través de la tubería de impulsión para mantenerlo dentro de los límites deseados. Sirve para detener el flujo de ingreso, cuando se requiere parar la bomba de ariete en caso de efectuar mantenimiento.

2.5.5.3. Válvula de impulso.

Esta válvula es el elemento principal, es una de las partes más sensibles e importantes en el funcionamiento de la bomba de ariete, su correcta selección y buen diseño, garantizarán la máxima eficiencia en el funcionamiento del dispositivo.

Está ubicada en el extremo aguas debajo de la tubería de alimentación, es la encargada de producir el golpe de ariete debido al cierre brusco que se produce por el efecto del incremento de la velocidad del agua, cuyo cierre instantáneo origina la sobrepresión que permite bombear parte del agua de alimentación del ariete y cuya apertura permite la salida o alivio. Esta válvula permite regular la cantidad de agua que penetra en la cámara de aire, por lo cual varía el número de golpes por minuto.

En el anexo B se presenta una breve descripción de algunos tipos de válvulas de impulso utilizadas por fabricantes de bombas de ariete en el mercado.

2.5.5.4. Válvula de aire.

Es un pequeño orificio ubicado por debajo de la válvula de retención, permite ingresar y renovar lentamente el aire que se pierde al mezclarse con el agua y salir junto con ella a través de la tubería de descarga.

2.5.5.5. Válvula de retención.

Válvula de tipo check, localizada al ingreso de la cámara de aire, es la que permite el paso del agua desde la caja de válvulas hasta la cámara de aire, cuya apertura origina el paso de una parte del gasto de alimentación hacia la cámara de aire y cuyo cierre evita el flujo en sentido opuesto debido a los efectos del rebote que se produce con el aire comprimido dentro de la cámara, lo que hace que el agua sea impulsada hasta un nivel superior al de captación.

2.5.5.6. Cámara de presión.

Está ubicada inmediatamente por encima de la válvula de retención, el aire comprimido que en ella se confía permite el ascenso del agua a través de la tubería de descarga debido a que actúa en forma similar a la de un resorte. Este dispositivo absorbe la sobrepresión (funciona como amortiguador de los golpes de ariete), e impulsa el agua por la tubería, dando de esta forma un flujo casi continuo, logrando un nivel superior al de captación.

Expertos realizaron pruebas y afirman que el volumen del acumulador del ariete no influye de forma sustancial en la eficiencia global del ariete, pero su tamaño incide en las condiciones de flujo en la descarga, produciendo un flujo menos intermitente en la medida en que se aumente el volumen del acumulador (Quiroga J., Sierra C. y Biancha G., 2013. p 7).

2.5.6. Conducto vertical o tubería de descarga.

El conducto vertical es el que transporta el agua desde la cámara de aire hacia el tanque elevado (tanque de almacenamiento o sistema de distribución). En este conducto no se produce ningún tipo de golpe siempre y cuando el ariete este bien dimensionado. Por tanto, este conducto no necesariamente debe ser rígido, puede colocarse de plástico, incluso es preferible porque la cantidad de pérdidas por fricción es inferior a la de otros materiales.

2.5.7. Tanque de almacenamiento.

Lugar donde se capta y almacena el agua que fue bombeada gracias a los favores que permite el ariete hidráulico, para luego ser aprovechada para el uso que corresponda.

En su funcionamiento normal el bombeo de agua es continuo, por lo que se recomienda prever un rebose, así se produce un intercambio de agua constante.

2.6. Principio de funcionamiento del ariete hidráulico.

Para comprender claramente el principio de funcionamiento del Ariete Hidráulico, nos auxiliaremos de la figura 2.20.

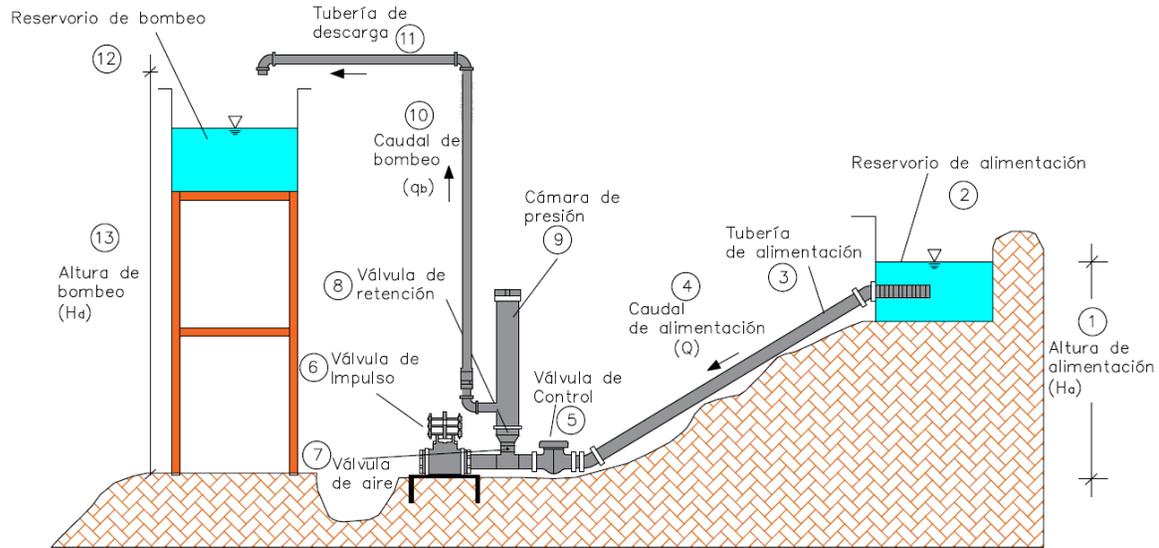


Figura N° 2.20. Esquema del principio de funcionamiento del ariete hidráulico.
Fuente: Elaboración propia.

Al abrir la válvula de control (5) el agua que fue almacenada en la fuente de alimentación (2) desciende por gravedad por la tubería de alimentación (3) debido al desnivel “ H_a ” (1) con relación al ariete hidráulico y fluye hacia la válvula de impulso o ímpetu (6) en una cantidad denominada caudal de alimentación (4). A medida que el agua desciende, aumenta su velocidad, generando presión dinámica que eventualmente fuerza el cierre de la válvula.

Este cierre brusco de la válvula de impulso provoca el fenómeno conocido como golpe de ariete o choque hidráulico, originando una sobrepresión en la tubería de alimentación. Por un lado, la sobrepresión resultante activa la apertura de la válvula de retención - check (8), lo que permite que una parte del fluido ingrese en la cámara de aire (9), comprimiendo el aire existente y haciendo que cierta cantidad de agua (10) ascienda por la tubería de descarga (11) hasta la altura “ H_d ” requerida (13).

Parte del agua retrocede por la tubería de alimentación, ocasionando una ligera acción de succión en el interior del cuerpo del Ariete o caja de válvula. Esta acción de succión crea una caída de presión que produce la apertura de las válvulas de ímpetu (impulso) y, simultáneamente, el cierre de la válvula de retención (descarga). Igualmente, la presión de succión activa la válvula de aire permitiendo el ingreso de aire al sistema que renueva el aire de la cámara.

De esta manera se crean las condiciones para que se repita el ciclo de operaciones. Durante este proceso, el aire comprimido continúa impulsando el líquido almacenado en el cuerpo del ariete a través de la tubería de descarga, lo que da como resultado un flujo de agua prácticamente uniforme hacia el tanque de almacenamiento (12).

El aire de la cámara se pierde en el flujo bombeado, se coloca la válvula de aire (7) en una ubicación óptima, que es debajo de la válvula de retención, Esta válvula funciona aprovechando la onda de presión negativa que produce una depresión en la caja del ariete y al producirse dicha depresión, succiona una pequeña cantidad de aire, su trabajo es renovar el contenido de aire en la cámara, en caso no se renovase toda la cámara de aire se saturaría de agua.

2.7. Periodos en que se divide el ciclo de trabajo del ariete.⁷

En la figura 2.21. se presenta la secuencia de los eventos que ocurren a lo largo de un ciclo completo de operaciones, junto con la relación entre la velocidad del agua en el extremo de la tubería de alimentación (en proximidad a la caja de válvulas) en función del tiempo y el tiempo de duración de cada uno de estos eventos. A partir de estas relaciones se puede determinar tanto el agua que se desplaza a través de la válvula de ímpetu o impulsión, como la cantidad de agua bombeada en cada ciclo.

Como punto de partida tenemos el cuerpo de válvulas lleno de agua (sistema lleno), las válvulas de impulsión se cierran debido a la presión de la carga inicial " H_a ", esto genera que se habrá la válvula de retención y permita que el agua ingrese y suba en la tubería de descarga hasta un nivel " h_a " debido al principio de vasos comunicantes. Seguido de este primer paso, se debe accionar la válvula de impulso manualmente, extrayendo el aire de las tuberías, hasta que el ariete empiece a funcionar automáticamente.

⁷ Ma Chi. (2002). Hydraulic Ram Handbook. Borda. P 69 y Ayala M. (2006). Diseño y construcción de un ariete multipulsor. P 18.

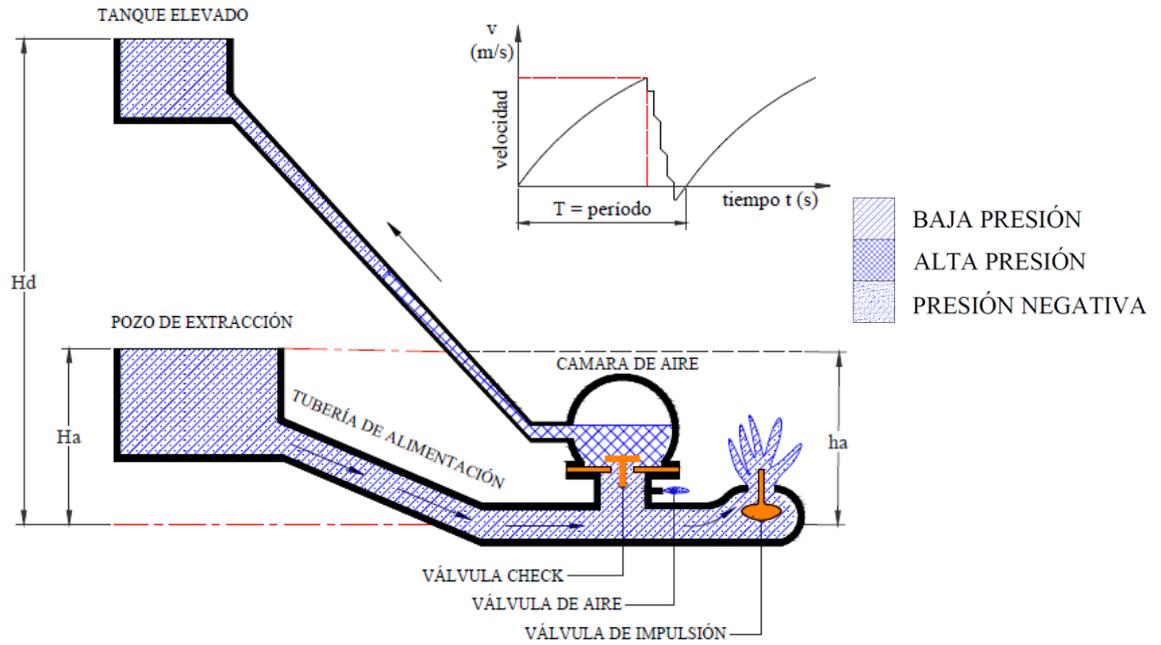


Figura N° 2.21. Eventos que se presentan en un ciclo.
Fuente: Ayala M., 2006.

En la figura 2.22 se muestra la representación gráfica de los periodos. Velocidad-tiempo.

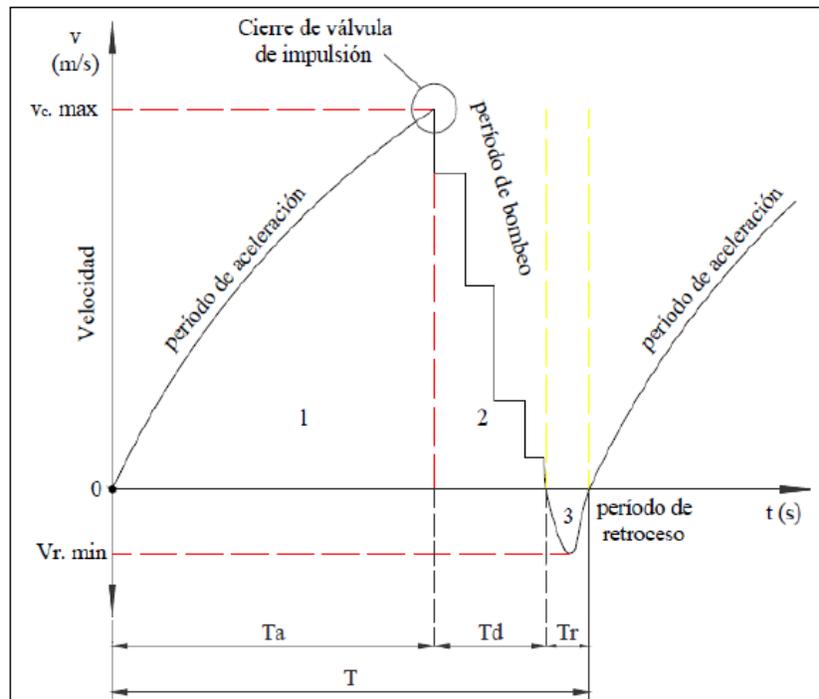


Figura N° 2.22. Representación de los periodos. Grafica de velocidad vs tiempo.
Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María, 2014.

$$T = Ta + Td + Tr \quad (1)$$

Donde:

Ta : Tiempo de duración del periodo de aceleración (s).

Td : Tiempo de duración del periodo de bombeo (s).

Tr : Tiempo de duración del periodo de retroceso (s).

T : Tiempo de duración del ciclo (s).

v_c : Velocidad del agua en la tubería de alimentación en el momento del cierre de la válvula de impulsión (m/s).

v_r : Velocidad del agua durante el período de flujo invertido (m/s).

$v(t)$: Velocidad del agua en la tubería de alimentación en los diferentes instantes de tiempo (m/s).

Luego de haber analizado los periodos en que se divide los ciclos de trabajo, buscamos determinar el caudal de bombeo (q_b) y el caudal derramado (Q_p) por la válvula de impulso, siendo Q el caudal total, (Tacke J.H.P.M. 1985).

$$Q = Q_p + q_b \quad (2)$$

$$q_p = \frac{1}{T} * \frac{\pi D^2}{4} \int_{Ta}^{Ta+Td} v(t) dt \quad (3)$$

$$Q_p = \frac{1}{T} * \frac{\pi D^2}{4} \left[\int_0^{Ta} v(t) dt + \int_{Ta+Td}^{Ta} v(t) dt \right] \quad (4)$$

Donde:

D : Diámetro interior de la tubería (m).

T : Periodo (s).

v : Velocidad del agua en la tubería de alimentación (m/s).

El aprovechamiento del golpe de ariete se divide en 3 periodos bien definidos durante el ciclo de operación:

a) Periodo 1: Aceleración o derrame (T_a)

Este periodo se inicia desde el instante en que la energía cinética del agua es nula, lo que implica que la velocidad en la tubería de suministro es igual a cero ($v=0$). Durante este tiempo las válvulas de impulsión están abiertas mientras que la de retención permanece cerrada. La apertura de la válvula de descarga permite que el agua comience a descender desde el tanque de alimentación a través de la tubería de suministro impulsada por efecto de la gravedad debido al desnivel " H_a " (ver Figura 2.23). Este flujo genera una sobrepresión en el cuerpo de válvulas lo que provoca el cierre de las válvulas de impulsión (ver figura 2.24) marcando así el final del periodo 1 y el inicio del periodo 2.

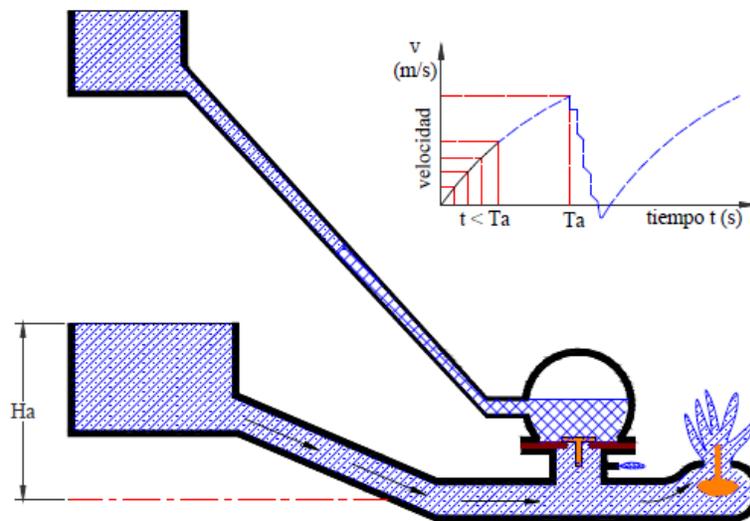


Figura N° 2.23. Inicio del primer periodo de la operación del ariete hidráulico. Aceleración del fluido y derrame por la válvula de impulsión.

Fuente: Ayala M., 2006.

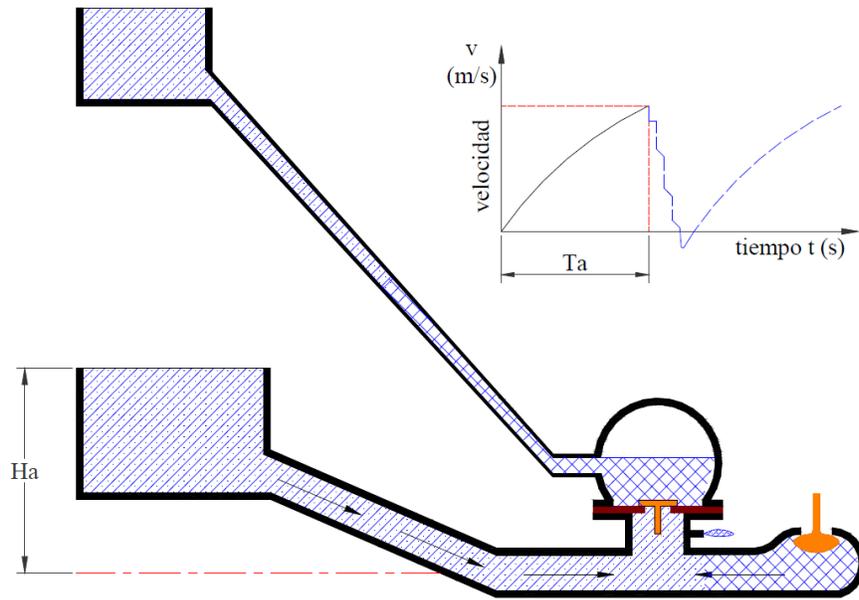


Figura N° 2.24. Cierre de las válvulas de impulso.
Fuente: Ayala M., 2006.

b) Periodo 2: Entrega o bombeo (T_d)

El periodo 2 inicia en el instante en que se cierran las válvulas de impulso y concluye en el momento en que se produce la desaceleración del flujo en la cámara de aire.

La válvula de impulso se cierra rápidamente por la presión cinética causada por el flujo de agua. El cierre abrupto de la válvula detiene de forma inmediata el flujo de agua. En este instante se produce una sobrepresión en la caja de válvulas que empuja la válvula de retención para abrirla. La alta presión del agua se amortigua en la cámara de aire y, al mismo tiempo, empuja una parte del agua hacia la tubería de suministro.

$$(T_a < t < T_a + T_d); (0 < V < V_c)$$

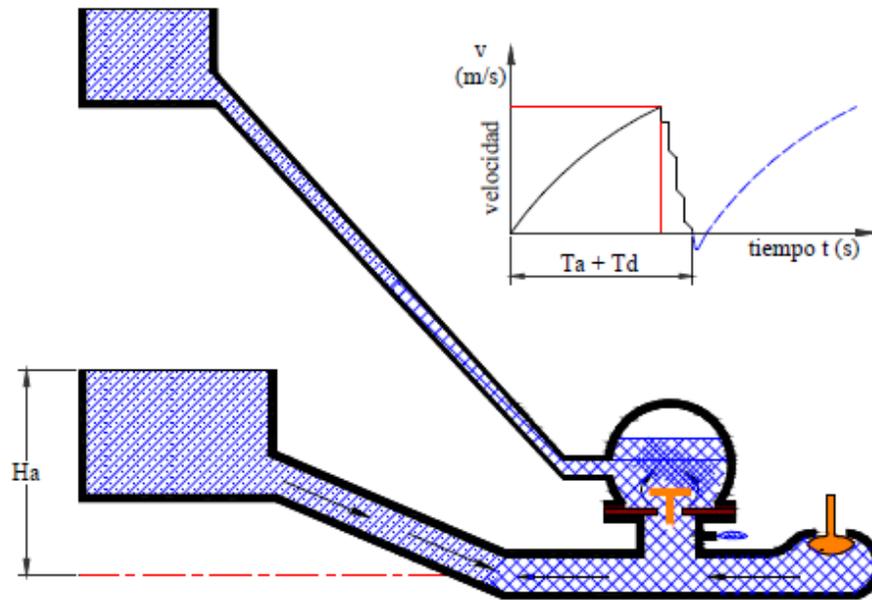


Figura N° 2.25. Segundo periodo de la operación del ariete hidráulico.
Amortiguación en la cámara de aire.

Fuente: Ayala M., 2006.

c) Periodo 3: De retroceso o de flujo invertido (T_r)

Este periodo incluye el tiempo en que tarda en cerrar la válvula de retención (Figura 2.26), se produce la caída de presión en el cuerpo del ariete (caja de válvulas) y la reapertura de las válvulas de impulsión en el instante en que la velocidad se hace cero ($v=0$), iniciándose un nuevo ciclo.

$$(T_a + T_d < t < T); (v_t < v < 0)$$

En este periodo se observa que el colchón de aire que hay en la cámara de aire ejerce una presión sobre la válvula de retención (válvula check) haciendo que esta se cierre, el agua ascienda por la tubería de descarga y no retorne a la tubería de suministro. El flujo toma sentido negativo (en dirección al tanque de abastecimiento).

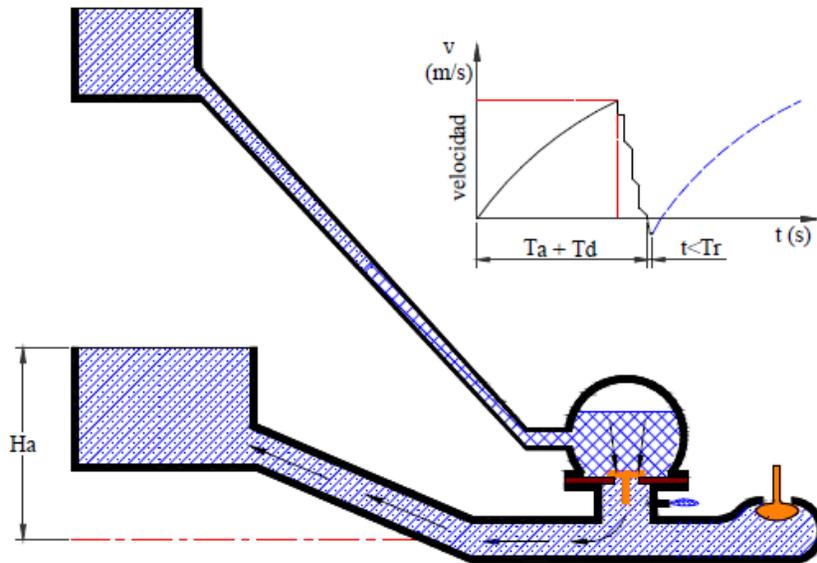


Figura N° 2.26. Tercer periodo de la operación del ariete hidráulico.
Cierre de la válvula de descarga.
Fuente: Ayala M., 2006.

El retroceso del agua por la tubería de alimentación produce una caída de presión (succión) en el cuerpo del ariete (caja de válvulas) Figura 2.27, generándose la renovación de aire en la campana neumática por la válvula de aire y al mismo tiempo se produce la reapertura de la válvula de impulsión, empezando un nuevo ciclo de trabajo (Figura 2.28).

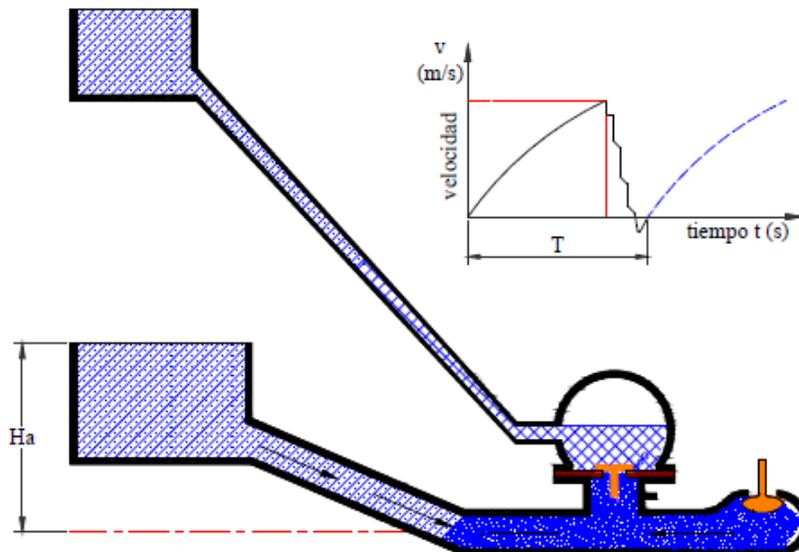


Figura N° 2.27. Tercer periodo de la operación del ariete hidráulico.
Caída de presión en la caja de válvulas.
Fuente: Ayala M., 2006.

El aire de la cámara neumática se pierde en el flujo bombeado, sino se renovase, manteniendo el nivel de aire se saturaría de agua, por esta razón se coloca la válvula de aire. Esta válvula funciona aprovechando la onda de presión negativa que produce una depresión en el cuerpo del ariete y al producirse dicha depresión, succiona una pequeña cantidad de aire que va a renovar el aire de la cámara neumática.

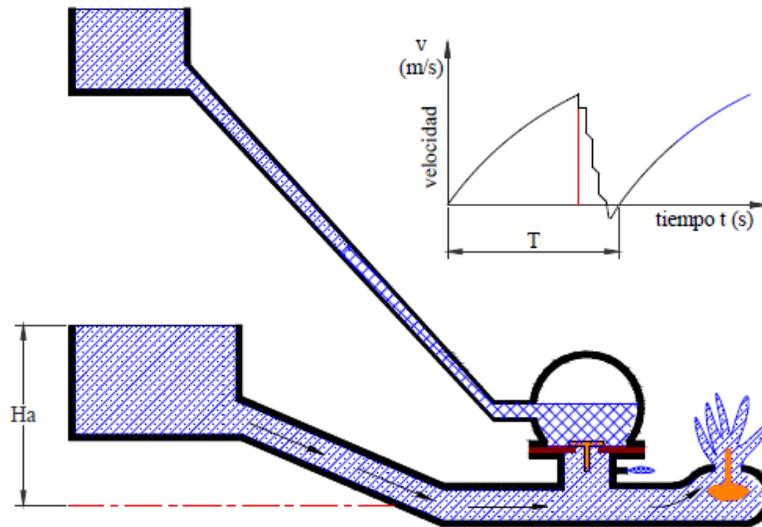


Figura N° 2.28. Reapertura de las válvulas nuevo ciclo de trabajo.
Fuente: Ayala M., 2006.

2.8. Algunos tipos constructivos de bombas de ariete.

A lo largo de la historia de la bomba de ariete, se han observado variaciones en algunos aspectos constructivos, motivadas por diversos objetivos. Estas modificaciones han sido llevadas a cabo por los fabricantes con el fin de adaptar la bomba a condiciones específicas, mejorar su rendimiento o cumplir con requisitos estéticos.

Entre las razones para estas variaciones se encuentra la necesidad de lograr mayor altura y caudal de bombeo, aumentar la robustez del dispositivo o simplemente por razones estéticas.

Es importante destacar que, si bien pueden cambiar ciertos aspectos de la bomba de ariete, el principio fundamental de su funcionamiento permanece invariable. Aunque la forma y el diseño de la bomba puedan variar, la esencia de su operación se mantiene constante a lo largo del tiempo, lo que destaca la versatilidad de este ingenioso dispositivo hidráulico.

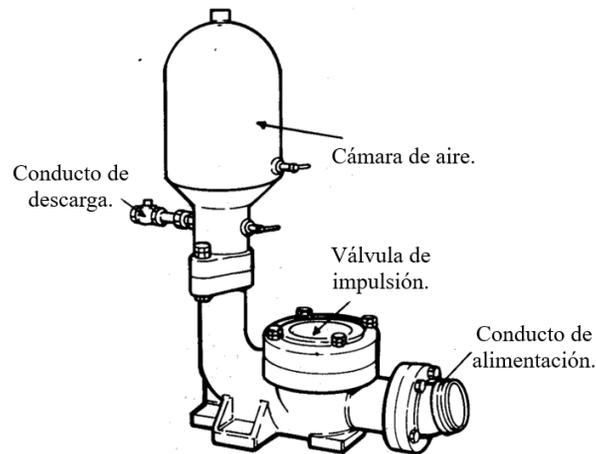


Figura N° 2.29. Ariete hidráulico de fabricación europea.
Fuente: Fraenkel P.L., 1994.

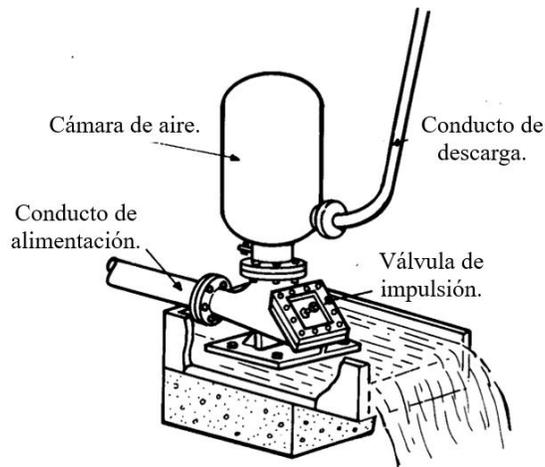


Figura N° 2.30. Ariete hidráulico utilizado en el sudeste de Asia.
Fuente: Fraenkel P.L., 1994.

Los modelos tradicionales, como los que se muestran en la Figura 2.29. y se desarrollaron hace un siglo en Europa, son muy robustos. Suelen estar fabricados a partir de grandes piezas de hierro fundido. El ariete hidráulico de la Figura 2.29. se diferencia del diagrama esquemático de la Figura 2.30. por la válvula de choque que está ubicada en el lado de la tubería de suministro, pero el principio de funcionamiento es el mismo.

Los modelos más ligeros, hechos de chapa de acero soldada (figura 2.31.), se utilizaron por primera vez en Japón y luego en otras regiones como el sudeste asiático, especialmente Taiwán y Tailandia. Ciertamente son menos costosos, pero al estar fabricados con materiales ligeros, su vida útil es más corta (alrededor de diez años) y se corroen fácilmente.

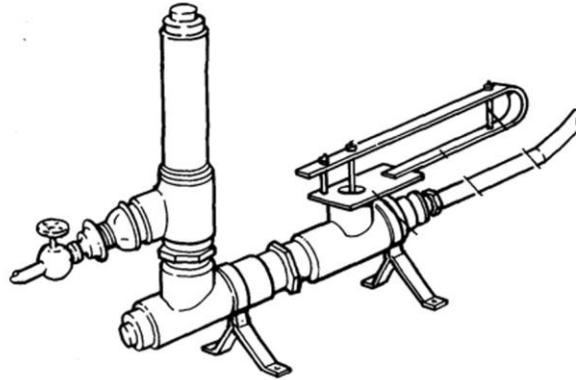


Figura N° 2.31. Ariete hidráulico fabricado a partir de piezas especiales de conductos.
Fuente: Fraenkel P.L., 1994.

2.9. Arietes en serie y en paralelo⁸.

En el contexto de aprovechamiento de arietes hidráulicos, se plantea la posibilidad de instalar múltiples juegos de estos dispositivos, ya sea en configuración paralela o en serie, dependiendo de las condiciones locales y requerimientos específicos.

Cuando el recurso hídrico es abundante y la demanda de agua es alta, un único ariete hidráulico puede resultar insuficiente para cubrir las necesidades. En tales casos, se sugiere la instalación de varios arietes hidráulicos en configuración paralela.

Esta estrategia no solo permite optimizar la eficiencia y capacidad de producción de agua, sino que también contribuye a garantizar un suministro confiable y sostenible en comunidades con alta demanda hídrica.

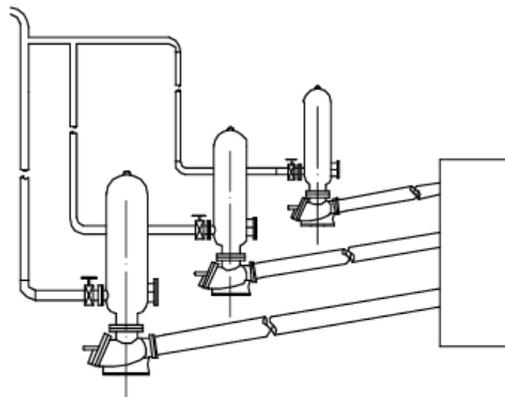


Figura N° 2.32. Sistema de Arietes hidráulicos en paralelo.
Fuente: Ma Chi, 2002.

⁸ Ma Chi. (2002). Hydraulic Ram Handbook. Borda.

En situaciones donde la demanda de agua supera la capacidad de un solo ariete hidráulico, se sugiere la instalación de dos o tres arietes hidráulicos en serie. Este enfoque permite aumentar la capacidad de producción de agua al aprovechar de manera secuencial el flujo disponible.

Es importante considerar que, al instalar los arietes hidráulicos en serie, el tipo de ariete hidráulico utilizado en el segundo paso debe ser de un tamaño más pequeño que el del ariete hidráulico instalado en el primer paso. Esto se debe a que el agua de cola del ariete hidráulico más grande se convierte en la fuente de alimentación del ariete hidráulico más pequeño, siguiendo el principio de “El agua de cola del más grande es la fuente del más pequeño”.

Este enfoque de instalación en serie no solo maximiza la eficiencia del sistema, sino que también optimiza el aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles.

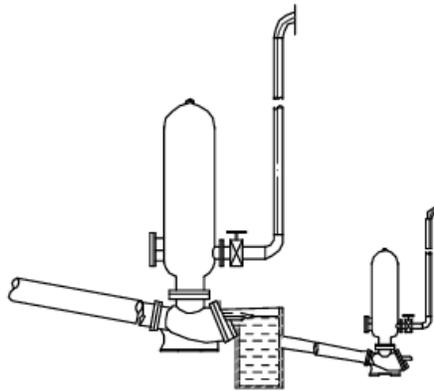


Figura N° 2.33. Dos Arietes hidráulicos colocados en serie.
Fuente: Ma Chi, 2002.

2.10. Fundamento teórico para el diseño de una bomba de ariete.

Parámetros para el diseño de un ariete hidráulico.

Para la selección apropiada de una bomba de ariete, es esencial considerar varios aspectos fundamentales:

- Caudal disponible (litros/min).
- Altura de alimentación (metros).
- Altura de elevación requerida (metros).

2.10.1. Localización de la bomba.

Entre las condiciones que se deben cumplir para que una bomba de ariete funcione de manera óptima están:

- Flujo constante de agua: La bomba de ariete requiere un suministro continuo de agua para generar la energía cinética necesaria para su funcionamiento.
- Desnivel adecuado: Es necesario un desnivel (o caída) entre el tanque de abastecimiento y la bomba de ariete. Este desnivel proporciona la energía potencial que se convierte en energía cinética cuando el agua fluye hacia la bomba

El lugar de instalación debe cumplir con estos requisitos.

Identificar la ubicación óptima para la instalación de la bomba es un paso fundamental que influirá en aspectos críticos relativos a su diseño y desempeño.

2.10.2. Altura de entrega o descarga (H_d).

La altura de entrega se refiere al esfuerzo requerido por la bomba para elevar el fluido hasta un nivel específico, para utilizar el fluido en diversas funciones como el riego, almacenamiento de agua, entre otras. Por lo general, se expresa en metros.

2.10.3. Altura de suministro o alimentación (H_a).

La altura de suministro representa la diferencia de altura entre el espejo de agua del tanque de captación y el punto de instalación del ariete. Esta diferencia de altura impulsa el flujo de agua a través del sistema y es fundamental para su rendimiento. En general, se observa que, a mayor altura de suministro, mayor será el rendimiento del ariete. Por consiguiente, es imperativo buscar la mayor caída posible en el terreno para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

Para establecer la altura con la cual se debe contar para llegar al nivel de descarga requerido se hace uso de relaciones matemáticas realizadas por fabricantes y expertos en el tema. Kevin Smith realiza una publicación en la que propone utilizar la relación expresada en la ecuación (5) para determinar la altura de suministro, La altura mínima para instalar un ariete hidráulico es de un metro y la altura máxima es de veinte metros. (Martínez D., 2013),

$$H_a = \frac{1}{10}H_d \quad (5)$$

H_a : Altura de alimentación (m)

H_d : Altura de descarga (m)

2.10.4. Tubería de suministro.

La tubería de suministro o alimentación tiene dos objetivos principales:

- a. Facilitar el flujo continuo y sin obstrucciones desde el tanque de suministro hacia la bomba logrando una ganancia adicional de velocidad en el flujo de agua.

Cuando la entrada de la tubería no está ensanchada en forma de trompeta, la corriente de agua tiende a romperse, creando torbellinos que generan pérdidas por fricción y reducen la eficiencia del sistema. Un efecto secundario de estas turbulencias en el agua es la formación de gases dentro del conducto de suministro (ver figura 2.34). Estos gases, al quedar atrapados en forma de pequeñas burbujas, actúan como parásitos dentro del sistema, creando una especie de colchón neumático que obstaculiza el flujo de agua y ralentiza el funcionamiento del ariete. Para garantizar un rendimiento óptimo del ariete hidráulico, es fundamental diseñar el conducto de entrada del agua de manera que promueva un flujo suave y sin interrupciones, evitando así la formación de torbellinos y la acumulación de gases que puedan afectar su funcionamiento (ver figura 2.35).

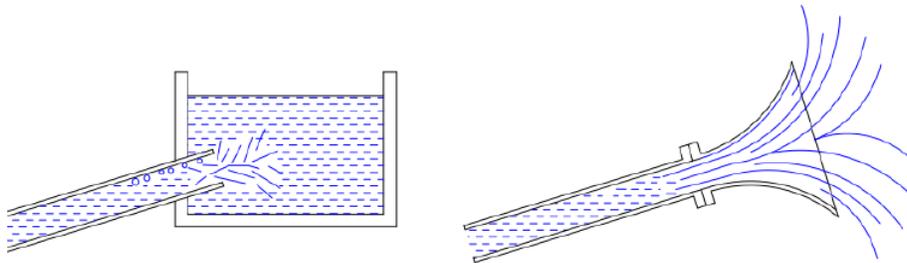


Figura N° 2.34. Entrada de la tubería de impulsión.

Fuente: Ayala M., 2006.

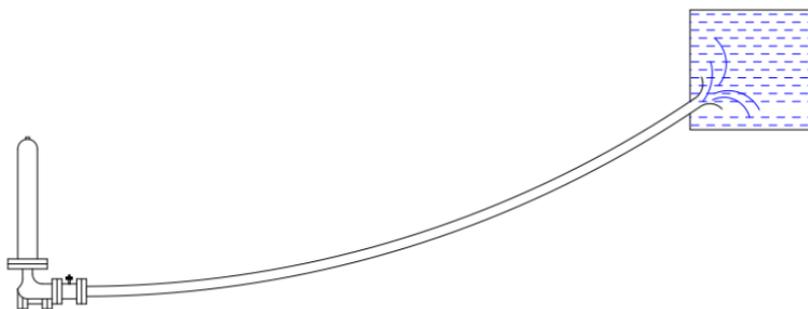


Figura N° 2.35. Instalación óptima del tubo de impulsión.

Fuente: Ayala M., 2006.

- b. Contrarrestar el impacto del golpe de ariete. Por este motivo se sugiere el uso de tuberías de acero galvanizado o hierro debido a su mayor rigidez y mínima resistencia al rozamiento, lo que optimiza la eficacia en la mitigación del golpe de ariete. A pesar de ello, se ha comprobado en la práctica que las tuberías de PVC, más económicas y maleables, también pueden ser empleadas. Para garantizar su uso efectivo, es necesario crear condiciones adecuadas de rigidez, como enterrar las tuberías bajo tierra, lo que además proporciona protección contra las heladas.

Este conducto debe ser lo más recto posible y no reducciones ni ángulos muy pronunciados, el ángulo de inclinación de la tubería de suministro debe estar comprendido entre los 10° y 45° con la horizontal (Romero G. y Gutiérrez L. 2014. P 226).

$$\text{Sen } \alpha = \frac{H_a}{L} = \frac{\text{desnivel}}{\text{longitud}} \quad (6)$$

La longitud del tubo de impulsión guarda relación directa con la altura de impulsión “ H_a ”. La longitud óptima de la tubería de impulsión según los estudios de Weinmann es 4 veces la altura de suministro. Si el caudal de la fuente es muy alto con una relación 3/1 es suficiente, en cambio si el caudal es bajo es recomendable alargar el conducto con una relación 6/1. (Martínez D., 2013).

$$L = 4 H_a \quad (7)$$

Donde:

L : Longitud de la tubería de suministro (m).

H_a : Altura de alimentación (m).

Debemos intentar que la tubería de suministro tenga una longitud superior a 10 metros e inferior a 30 metros, siempre y cuando esté dentro de lo posible, es decir:

$$10m < L < 30m$$

S.B. Watt en su publicación menciona que el ariete funcionará bien si la relación entre la longitud (L) y el diámetro (D) se encuentra en los límites mencionados en la siguiente relación:

$$\frac{L}{D} = 150 \text{ a } 500 \quad (8)$$

2.10.5. Tubería de descarga.

La tubería de descarga se encarga de conducir el fluido hasta el tanque de descarga. Su diámetro se calcula con la siguiente relación:

$$d = \frac{D}{4} \text{ a } \frac{D}{2} \quad (9)$$

Donde:

d : Diámetro de conducto de descarga (m).

D : Diámetro de conducto de suministro (m).

2.10.6. Propiedades de los fluidos.⁹

2.10.6.1. Peso específico.

Designa el peso de la unidad de volumen del líquido.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (10)$$

Donde:

γ : Peso específico (N/m³)

W : Peso del líquido (N)

V : Volumen (m³)

2.10.6.2. Densidad.

Se define como la cantidad de masa del líquido contenida en la unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (11)$$

⁹ Nekrasov. B. (1966). Hidráulica. Editorial Mir. P 13.

Donde:

ρ : Densidad (kg/m^3)

m : Masa del líquido (kg)

V : Volumen (m^3)

La relación entre densidad y peso específico es:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m * g}{V}$$

$$\gamma = \rho * g \quad (12)$$

Donde:

γ : Peso específico (N/m^3)

ρ : Densidad (kg/m^3)

g : Gravedad (m/s^2)

2.10.6.3. Viscosidad.

Es la propiedad del líquido de oponerse al desplazamiento o resbalamiento de sus capas. La viscosidad es la propiedad inversa a la fluidez; los líquidos con viscosidad mayor (glicerina, aceites de lubricación y otros) son menos fluidos y viceversa.

Cuando un líquido fluye por una tubería la velocidad en las paredes es cero y la mayor velocidad se encuentra en el centro del tubo.

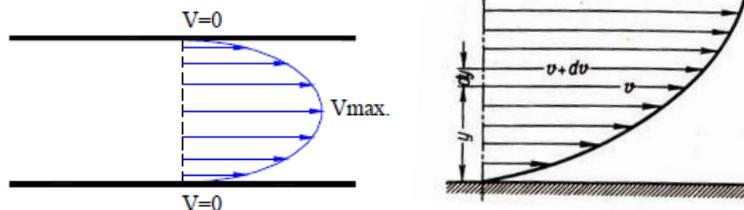


Figura N° 2.36. Distribución de la velocidad en la sección transversal de la tubería.

Fuente: Nekrasov. B., 1966.

Conforme a la hipótesis enunciada por primera vez por Newton en 1686, y más tarde demostrada experimentalmente por el profesor N. Petrov en 1883. La tensión tangencial en

los líquidos depende de la clase de éste y del carácter de la corriente. Si la corriente se efectúa en el régimen laminar, cambia en proporción directa al gradiente transversal de la velocidad.

Ley de viscosidad de Newton es:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Donde:

τ : Tensión tangencial (N/m²)

μ : Coeficiente dinámico de viscosidad del líquido.

$\frac{dv}{dy}$: gradiente de velocidad

Para determinar el coeficiente de viscosidad se resuelve la ecuación anterior respecto a μ .

$$\mu = \tau \frac{dy}{dv}$$

Junto con el coeficiente dinámico de viscosidad “ μ ” se emplea también el coeficiente cinemático de viscosidad “ ν ” en m²/s igual a:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{13}$$

2.10.7. Caudal de alimentación o suministro (Q).

Es la cantidad de líquido que circula por la tubería de suministro en un tiempo determinado.

2.10.7.1. Numero de Reynolds.

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. Cuyo valor se calcula mediante la ecuación (14).

$$Re = \frac{vD}{\nu} \tag{14}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds (adimensional)

ν : Viscosidad cinemática del fluido en cuestión (m^2/s)

v : Velocidad del fluido (m/s)

D : Diámetro interno de la tubería (m)

En el caso de una tubería de sección circular, la expresión del número de Reynolds en función del caudal se indica en la ecuación (15).

$$Q = v * A \rightarrow v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi * \frac{D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$Re = \frac{\frac{4Q}{\pi D^2} D}{\nu}$$

$$Re = \frac{4Q}{\pi \nu D} \quad (15)$$

$Re < 2000$ corresponde a un régimen laminar.

$2000 \leq Re \leq 4000$ corresponde a un régimen transicional.

$Re > 4000$ corresponde a un régimen turbulento.

2.10.7.2. Rugosidad relativa.

Es la relación del diámetro de la tubería y la rugosidad promedio de su pared.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D} \quad (16)$$

Donde:

ε_r : Rugosidad relativa.

ε : Rugosidad absoluta (mm).

D : Diámetro (mm).

2.10.7.3. Factor de fricción.

Cuando el régimen es laminar $Re \leq 2300$, el factor de fricción “ f ” depende únicamente del número de Reynolds y puede calcularse mediante la expresión de Poiseuille (ecuación 17).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (17)$$

En el caso del régimen turbulento ($Re \geq 2300$), puede calcularse el factor de fricción mediante la expresión de Colebrook-White (ecuación 18).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (18)$$

2.10.7.4. Pérdidas mayores o de fricción.

Existe una gran variedad de expresiones para el cálculo de la pérdida de carga en tuberías, entre las que se encuentra la que usualmente se denomina ecuación de Darcy-Weisbach (en adelante DW).

La fórmula de DW es completamente general y sirve para el cálculo de pérdidas de carga tanto para un flujo laminar como turbulento. Las características del flujo influyen decisivamente en el cálculo del factor de fricción “f” sin afectar al resto de términos de la fórmula de DW. Fue desarrollada por el ingeniero francés Henry Darcy y refinada por el ingeniero alemán Julius Weisbach en 1845 (ver ecuación 19).

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (19)$$

h_f : Pérdida de carga por fricción (m)

f : Factor de fricción (adimensional)

L : Longitud de la tubería (m)

D : Diámetro de la tubería (m)

v : Velocidad media del flujo (m/s)

g : Aceleración gravitacional (m/s^2)

La expresión de pérdidas por fricción en función del caudal se determina mediante la ecuación (20).

$$h_f = \frac{8 * f * L}{\pi^2 * g * D^5} * Q^2 \quad (20)$$

2.10.7.5. Pérdidas menores o locales.

Algunos elementos y complementos especiales de las tuberías como codos, ramificaciones de tubos, modificaciones de la sección transversal o incluso válvulas generan pérdidas de presión adicionales además de las pérdidas por fricción de las paredes.

$$h_l = k * \frac{v^2}{2 * g} \quad (21)$$

Donde:

h_l : Pérdidas locales (m).

k : Coeficiente de pérdidas locales (adimensional).

v : Velocidad media en la tubería (m/s).

g : Aceleración gravitacional (m/s²).

2.10.7.6. Ecuaciones para el cálculo del caudal de suministro.

Para calcular el caudal que circula por la tubería de suministro debemos conocer los siguientes datos: el diámetro de la tubería, las pérdidas de carga y la rugosidad. Dependiendo del tipo de régimen (laminar o turbulento), se calcula el caudal.

Si el régimen es laminar, sustituyendo la ecuación del número de Reynolds (15) en la expresión del cálculo del factor de fricción (17) y este valor de “f” en la ecuación (20), resulta:

$$f = \frac{64}{Re}; Re = \frac{4Q}{\pi v D}$$

$$f = \frac{16\pi v D}{Q}$$

$$h_f = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} Q^2; f = \frac{16\pi v D}{Q}$$

$$h_f = \frac{128 * v * L * Q}{\pi * g * D^4}$$

Por lo tanto, el caudal circulante se calcula con la ecuación (22).

$$Q = \frac{\pi * g * D^4 * h_f}{128 * \nu * L} \quad (22)$$

En el caso que el régimen sea turbulento, calcularemos el caudal circulante con la ecuación (23).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

$$h_f = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} Q^2 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{Q}{\pi} * \sqrt{\frac{8L}{g D^5 h_f}}$$

$$\frac{Q}{\pi} * \sqrt{\frac{8L}{g D^5 h_f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{2,51 \nu}{4 D^{1,5}} * \sqrt{\frac{8L}{g h_f}} \right)$$

$$Q * 0,903 * \sqrt{\frac{L}{D^5 h_f}} = -2 \pi \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{0,5666 \nu}{D^{1,5}} * \sqrt{\frac{L}{h_f}} \right)$$

$$Q = -2,2148 \pi \sqrt{\frac{D^5 h_f}{L}} \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{0,5666 \nu}{D^{1,5}} * \sqrt{\frac{L}{h_f}} \right) \quad (23)$$

Donde:

Q : Caudal (m^3/s).

h_f : Pérdidas por fricción (m).

L : Longitud de la tubería de suministro (m).

ε_r : Rugosidad relativa.

D : Diámetro interno de la tubería (m).

ν : Viscosidad cinética del fluido (m^2/s).

2.10.8. Aplicación de la ecuación de Bernoulli.¹⁰

Utilizaremos la ecuación de Bernoulli para poder calcular las pérdidas hidráulicas para una corriente.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - H_{1-2} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (24)$$

$$H_{1-2} = h_{f_{1-2}} + \sum h_{l_{oc_{1-2}}} \quad (25)$$

Donde:

$\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}$: Alturas de presiones (m).

z_1, z_2 : Altura de posición (m).

$\frac{v_1^2}{2g}, \frac{v_2^2}{2g}$: Alturas de velocidad (m).

H_{1-2} : Pérdidas hidráulicas entre 1 y 2 (m).

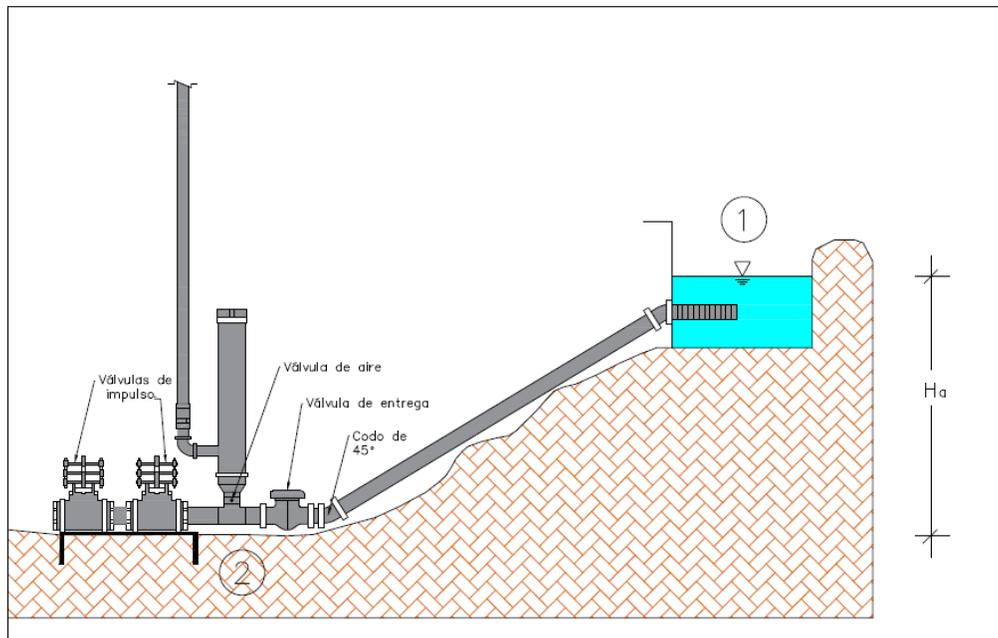


Figura N° 2.37. Ubicación del tramo 1-2
Fuente: Elaboración propia.

¹⁰ Mataix C. (1986). Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. p 112.

2.10.9. Velocidad en salida de las válvulas.

Para determinar la velocidad de salida de la válvula de impulso se aplica la ecuación de Bernoulli, donde:

$$\begin{aligned}P_1 &= P_2 \\z_1 &= H_a \\z_2 &= 0 \\v_1 &= 0 \\v_2 &=?\end{aligned}$$

Reemplazando estos datos en la ecuación de Bernoulli, se obtiene la ecuación (26).

$$\begin{aligned}z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - H_{1-2} &= z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \\H_a + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{0^2}{2g} - h_{f_{1-2}} - \sum h_{loc_{1-2}} &= 0 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \\H_a &= \frac{v_2^2}{2g} + f * \frac{L}{D} * \frac{v_2^2}{2 * g} + \sum k * \frac{v_2^2}{2 * g} \\H_a &= \frac{v_2^2}{2g} * \left(1 + f * \frac{L}{D} + \sum k\right) \\v_2 &= \sqrt{\frac{2 * g * H_a}{1 + f * \frac{L}{D} + \sum k}}\end{aligned}\tag{26}$$

2.10.10. Pérdida de presión total.

Multiplicando la ecuación de Bernoulli por el peso específico $\gamma = \rho g$ se obtienen unidades de presión ($\Delta p = h\gamma$).

$$\rho g z_1 + P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} - \Delta P_T = \rho g z_2 + P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}\tag{27}$$

Donde:

P_1, P_2 : Presión en el punto 1 y 2 (Pa).

$\rho g z_1, \rho g z_2$: Presión de peso (Pa).

$\frac{\rho v_1^2}{2}, \frac{\rho v_2^2}{2}$: Presión dinámica (Pa).

ΔP_T : Pérdidas de presión total (Pa).

Emplearemos la ecuación (28) para calcular la pérdida de presiones totales.

$$\Delta P_T = \Delta P_f + \sum \Delta P_l$$

$$\Delta P_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \gamma$$

$$\Delta P_l = k \frac{v^2}{2g} \gamma$$

$$\Delta P_T = f * \rho * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2} + \sum k * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (28)$$

2.10.11. Altura desarrollada por el ariete.

Para el cálculo de la altura desarrollada por el ariete debemos sumar la altura de descarga y las pérdidas hidráulicas (fricción, locales).

$$H_i = H_d + h_f + h_l \quad (29)$$

2.10.12. Cálculo del golpe de ariete.

Los dos parámetros más característicos del golpe de ariete son la relación causa-efecto (variación de velocidad-variación de presión), o pulso de Joukowsky, así como la celeridad a la que se propagan las perturbaciones en la conducción. Ambos parámetros pueden obtenerse mediante la aplicación de balances integrales a la conducción, tal y como puede verse con detalle en Abreu J., 1995.

2.10.12.1. Celeridad.¹¹

La celeridad “a”, es la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua contenida en la tubería. Su valor se puede determinar a partir de la ecuación de continuidad y depende principalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción.

¹¹ Mataix C. (1986). Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. p 317.

La expresión para el cálculo de la celeridad fue propuesta por Joukowsky:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_0}{\rho}}{1 + \frac{E_0 D}{E \delta}}} \quad (30)$$

Donde:

a : Celeridad onda elástica del fluido en la tubería (m/s).

E_0 : Módulo de elasticidad de volumen del fluido (N/m²).

ρ : Densidad del fluido (kg/m³).

E : Módulo de elasticidad del material de la tubería (N/m²).

D : Diámetro interior de la tubería (m).

δ : Espesor de la tubería (m).

2.10.12.2. El pulso de Joukowsky (Zhukovski).¹²

El resultado de un balance de fuerzas conduce a la expresión de Joukowsky (ecuación 31).

$$\Delta p = \rho a v \quad (31)$$

Donde:

Δp : Pulso de presión experimentado por la conducción al producirse una variación en las condiciones del flujo (Pa).

ρ : Densidad del fluido (kg/m³).

a : Celeridad de la onda de presión (m/s).

v : Variación experimentada por la velocidad del fluido (m/s).

2.10.12.3. Tiempo de cierre de la válvula.

Es el tiempo en que la onda de presión se tarda en recorrer la distancia entre la válvula y el otro extremo de la tubería.

¹² Pashkov N.N., Dolqachev F.M. (1985). Hidráulica y máquinas hidráulicas.

$$T = \frac{2L}{a} \quad (32)$$

Donde:

T : Fase o periodo de la tubería (s)

a : Celeridad onda elástica del fluido en la tubería (m/s).

L : Longitud de la tubería (m).

Cuando la onda de llega, esta cambia el sentido haciendo un nuevo recorrido de ida y vuelta en el mismo tiempo T , pero con signo contrario, bajo la forma de onda de depresión.

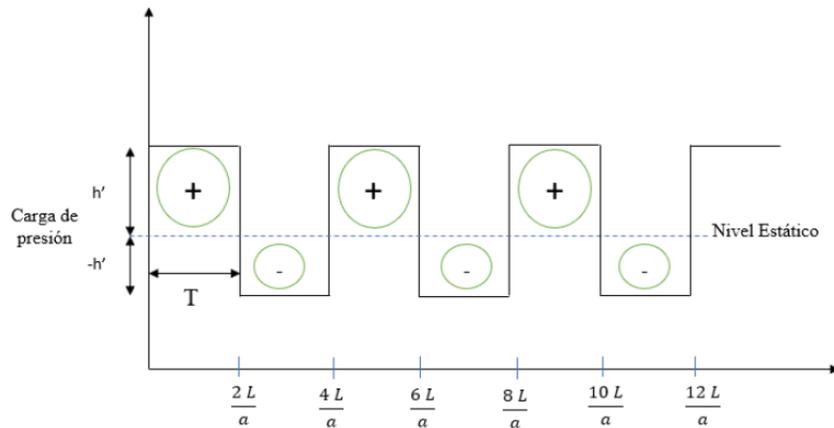


Figura N° 2.38. Variación teórica de la presión en la válvula.
Sin considerar pérdidas de fricción.
Fuente: Jaramillo C., 2013.

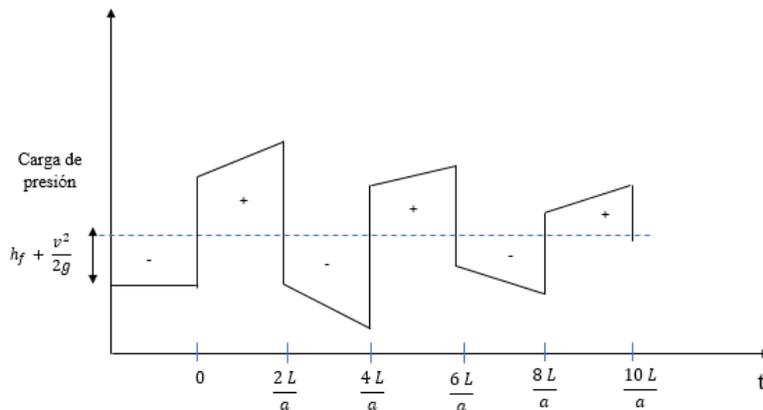


Figura N° 2.39. Variación real de la presión en la válvula.
Considerando pérdidas de fricción.
Fuente: Jaramillo C., 2013.

2.10.12.4. Cierre brusco.

El cierre brusco se da cuando el tiempo de propagación es mayor que el tiempo de cierre de la válvula de control del flujo (t_c), esto ocurre cuando la tubería de suministro es larga.

$$t_c < \frac{2L}{a} \quad (33)$$

Para este caso podemos utilizar la ecuación propuesta por Allievi, la cual nos permite obtener la magnitud de la sobrepresión que se presenta por el golpe de ariete.

$$\Delta H = \frac{v * a}{g} \quad (34)$$

Donde:

ΔH : Sobrepresión en metros de columna de agua (m.c.a).

a : Celeridad onda elástica del fluido en la tubería (m/s).

v : Velocidad del fluido (m/s).

2.10.12.5. Cierre lento.

El cierre lento se produce cuando el tiempo de propagación es menor que el tiempo de cierre de la válvula de control del flujo, esto sucede cuando la tubería de suministro es corta.

$$t_c < \frac{2L}{a} \quad (35)$$

Para este caso haremos uso de la ecuación de Michaud-Vensano para el cálculo de la sobrepresión, teniendo en cuenta que en esta expresión no se tomó en cuenta la compresibilidad del agua ni la elasticidad de la tubería.

$$\Delta H = \frac{2 * L * v}{g * t_c} \quad (36)$$

Donde:

ΔH : Sobrepresión en metros de columna de agua (m.c.a).

v : Velocidad del fluido (m/s).

t_c : Tiempo de cierre de la válvula (s).

a : Celeridad onda elástica del fluido en la tubería (m/s).

L : Longitud de la tubería (m).

2.10.13. Fuerza de arrastre sobre la válvula de impulso.¹³

Durante el periodo de aceleración en el funcionamiento de la bomba de ariete, el flujo de agua puede alcanzar una velocidad tal que comienza a ejercer una fuerza sobre la válvula de impulso. Este momento se caracteriza por un equilibrio entre las fuerzas de arrastre y la presión del agua, que contrarrestan el peso de la válvula.

Para comprender este fenómeno desde un punto de vista analítico, es posible representar la fuerza ejercida sobre la válvula como una fuerza de arrastre, la cual puede ser descrita mediante una ecuación específica (ecuación 37), la cual nos proporciona una herramienta para entender cómo cambian las condiciones dentro del sistema a medida que el flujo de agua se acelera y ejerce una influencia sobre la válvula de impulso.

$$F_d = \frac{1}{2} * C_d * \rho * v_0^2 * A_d \quad (37)$$

Donde:

F_d : Fuerza de arrastre sobre la válvula de impulso (N).

C_d : Coeficiente de arrastre (adimensional).

ρ : Densidad del fluido (kg/m³).

v_0 : Velocidad del fluido al iniciarse el cierre (m/s)

A_d : Área proyectada de la válvula de impulsión (m²)

La fuerza "F" ejercida sobre la válvula de derrame es igual al peso "W" y actúa hacia abajo, mientras que la fuerza de arrastre "F_d", que actúa en dirección opuesta a la fuerza "F" (hacia

¹³ Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. (1986). Proceedings of a workshop on hydraulic Ram Pump (Hydram) Technology.

arriba), debe ser mayor para que la válvula de derrame se cierre, iniciando así el movimiento de la válvula cuando estas fuerzas alcanzan la igualdad.

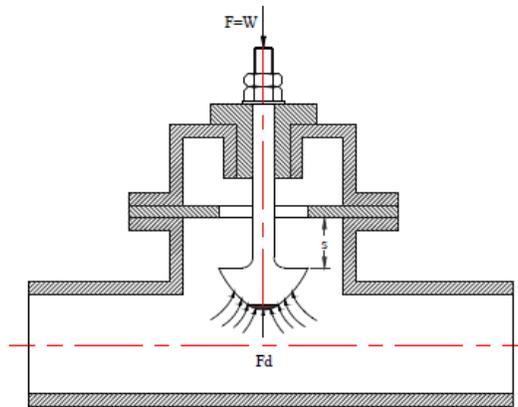


Figura N° 2.40. Carrera de la válvula de impulso.

Fuente: Ayala M., 2006.

El coeficiente de arrastre varía según la carrera de la válvula de impulso, J. Krol desarrolló una expresión que relaciona el coeficiente de arrastre con la carrera de la válvula “s” (ver ecuaciones 38 y 39), sin embargo, si la válvula corresponde a un disco el valor del coeficiente de arrastre es $C_d = 1,17$ (Quiroga J., Sierra C. y Biancha G., 2013).

$$C_d = \frac{0,345 - 0,275 s + 10^{0,52-6,85s}}{s} \quad (38)^{14}$$

Donde:

C_d : Coeficiente de arrastre (adimensional).

s: Carrera de la válvula de impulso (pulg).

$$C_d = \frac{0,282 - 8,854s + 0,8 \times 10^{0,52-270s}}{s} \quad (39)$$

Donde:

C_d : Coeficiente de arrastre (adimensional).

s: Carrera de la válvula de impulso (m).

¹⁴ Calvert N.G., (1957) The Hydraulic Ram, The Engineer. P 58.

Según las investigaciones realizadas por Stevenazzi D. en 1942, se concluyó que, para alcanzar el máximo rendimiento de un ariete hidráulico, es fundamental que la sección de descarga de la válvula de impulsión sea igual a la sección de la tubería de alimentación. Este hallazgo resalta la importancia de mantener un equilibrio adecuado entre estas secciones para optimizar el funcionamiento del ariete (Gutiérrez G., 2022).

2.10.14. Pérdida hidráulica en la válvula de impulso.

Después de realizar varias pruebas experimentales, J. Krol, determinó una expresión matemática para el cálculo de pérdidas originadas por la válvula de impulso.

$$R_s = \frac{2,43 - 1,06 s + 10^{0,95-13,3 s}}{s} \quad (40)$$

Donde:

R_s : Pérdida en válvula de impulsión (adimensional).

s : Carrera de la válvula de impulso (pulg).

2.10.15. Presión dinámica.

En el contexto del movimiento de un fluido a través de un conducto, se observa que la inercia generada por dicho movimiento resulta en un incremento adicional en la presión estática cuando el fluido choca contra un área perpendicular a su dirección de movimiento. Esta fuerza adicional es el resultado de la presión dinámica, la cual surge debido a la velocidad y densidad del fluido en cuestión.

Esta presión es capaz de cerrar la válvula de impulso contrarrestando su peso de la válvula.

$$P = \frac{\rho v^2}{2} \quad (41)$$

Donde:

P : Presión capaz de cerrar la válvula (Pa).

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).

v : Velocidad del fluido (m/s).

2.10.16. Peso máximo para la válvula de impulso.

Para determinar el peso de la válvula de impulso, J. Krol determinó una expresión matemática para su cálculo, ecuación (42).

$$0 < w < \frac{A_d * H_a * \rho * C_d}{M} \quad (42)$$

Donde:

A_d : Área proyectada de la válvula de impulso (m²).

H_a : Altura de alimentación (m).

C_d : Coeficiente de arrastre.

ρ : Densidad (kg/m³).

M : Sumatoria de pérdidas.

2.10.17. Presión máxima y mínima de instalación.

Según Mayol J.M., las presiones máxima y mínima generada por el golpe de ariete en las tuberías están expresadas por las ecuaciones (43) y (44).

$$H_{max} = H_a + \Delta H$$

$$P_{max} = \rho * g * H_{max} \quad (43)$$

$$H_{min} = H_a - \Delta H$$

$$P_{min} = \rho * g * H_{min} \quad (44)$$

Donde:

H_a : Presión ejercida por la altura de alimentación (m).

ΔH : Presión generada por el golpe de ariete (m).

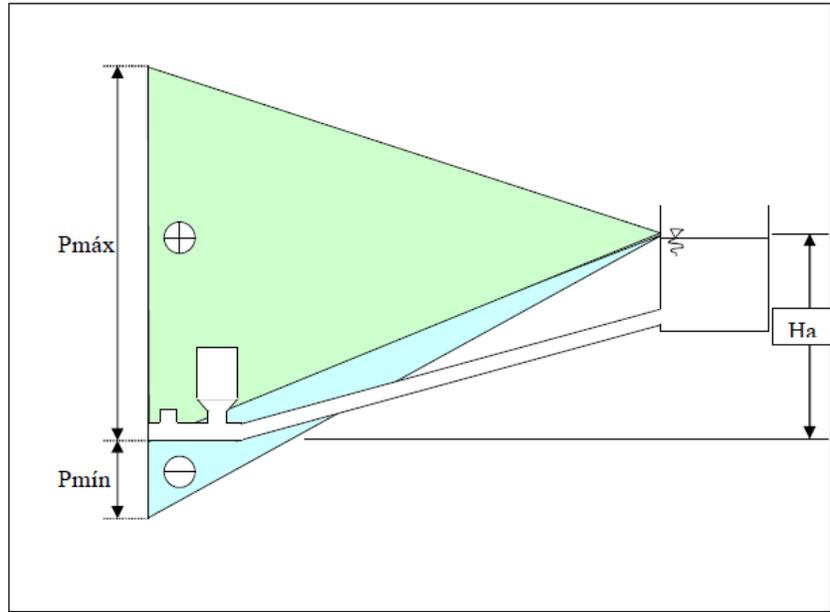


Figura N° 2.41. Presiones máxima y mínima de la instalación.
Fuente: Mesa J., 2003.

2.10.18. Potencia útil del ariete.

La potencia que se requiere para poder elevar el fluido hasta el tanque de descarga es proporcional a la tasa del flujo multiplicado por la altura de descarga y el peso específico del agua.

$$Pu = \rho * g * q_b * H_i \quad (45)$$

$$H_i = H_d + \sum h \quad (46)$$

Donde:

Pu : Potencia útil (W).

ρ : Densidad (kg/m^3).

g : Gravedad (m/s^2).

q_b ; Caudal de bombeo (m^3/s).

H_d : Altura de impulsión (m).

$\sum h$: Sumatoria de pérdidas hidráulicas (m).

H_d : Altura de descarga (m).

2.10.19. Potencia recibida.

La potencia recibida del agua de alimentación se calcula con la ecuación (47).

$$P_b = (Q_p + q_b) * \rho * g * H_a \quad (47)$$

Donde:

P_b : Potencia recibida (W).

Q_p : Caudal derramado por la válvula de impulso (m³/s).

$Q_p + q_b$: Caudal de alimentación (m³/s).

2.10.20. Eficiencia.

Por definición, la eficiencia está dada por la relación entre la potencia útil entregada en la descarga y la potencia recibida en el ariete.

$$\eta = \frac{P_u}{P_b} * 100 (\%) \quad (48)$$

Reemplazando las potencias tenemos la ecuación (49).

$$\eta = \frac{q_b * H_i}{(Q_p + q_b) * H_a} * 100 (\%) \quad (49)$$

2.10.21. Rendimiento volumétrico.

El rendimiento es la relación que existe entre el caudal de descarga y el caudal de alimentación del ariete hidráulico.

$$\eta_v = \frac{q_b}{(Q_p + q_b)} * 100 (\%) \quad (50)$$

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. Fabricación de un prototipo de bomba de ariete.

El tamaño del ariete hidráulico viene determinado por el diámetro de su cuerpo y sus unidades de medida son las pulgadas.

Dado el enfoque de la investigación, centrado en comprender el principio de funcionamiento de una bomba de ariete, se ha tomado la decisión de construir un prototipo que permita apreciar dicho principio de manera efectiva. Considerando este objetivo, se optó por fabricar el prototipo utilizando materiales de 1 pulgada de diámetro.

La elección de utilizar tuberías y accesorios de 1 pulgada se basa en la necesidad de mantener el prototipo simple y accesible, facilita la disponibilidad y accesibilidad de los componentes necesarios para la construcción del prototipo, lo que nos permite llevar a cabo el proyecto de manera eficiente y económica mientras se demuestra de manera clara y efectiva el funcionamiento del ariete hidráulico. Aunque el tamaño puede limitar la capacidad de producción de agua en comparación con modelos comerciales de mayor tamaño, este prototipo nos proporcionará una plataforma sólida para observar y comprender los principios fundamentales y el funcionamiento básico esencial de la bomba de ariete.

Un ariete hidráulico pequeño es más fácil de manejar y transportar durante las pruebas y experimentos. Esto facilita la realización de pruebas en campo en diferentes ubicaciones y de manera más eficiente.

3.1.1. Materiales necesarios.

En el desarrollo de un prototipo de bomba de ariete, es común utilizar materiales más accesibles y económicos en comparación con los empleados en una bomba de ariete comercial. Estos materiales suelen ser más ligeros o de menor calidad, lo que simplifica el proceso de fabricación y reduce los costos asociados. Además, esta elección facilita la realización de ajustes y modificaciones durante la fase de desarrollo, permitiendo una mayor flexibilidad en el diseño y la optimización del prototipo.

El uso de materiales más asequibles también posibilita la realización de pruebas y demostraciones con mayor facilidad, ya que simplifica la visualización y comprensión de los principios de funcionamiento de la bomba de ariete.

La tabla 3.1. muestra los materiales empleados para la construcción del prototipo de ariete hidráulico.

Tabla N° 3.1. Materiales para la construcción del prototipo de ariete hidráulico.

Cantidad	Unidad	Material
1	pza.	Espiga de 1" con rosca macho de 1"
1	pza.	Espiga de ½" con rosca macho de ½"
1	pza.	Llave de paso de 1"
1	pza.	Llave de paso de ½"
5	pza.	Niples de 1"
2	pza.	Niple de ½"
2	pza.	Tees de 1"
1	pza.	Codo de 1"
1	pza.	Válvula de pie de 1"
1	pza.	Válvula de no retorno de 1"
1	pza.	Reducción de PVC de 1" a ¾" (con rosca)
1	pza.	Reducción de PVC de 1" a ½" (con rosca)
1	pza.	Adaptador macho de ¾"
0,5	m	Tubo de PVC roscable de ¾"
1	m	Tubo de PVC de 1 ½"
1	pza.	Buje reductor de 1 ½" a ¾" (con junta para pegar)
1	pza.	Acoplamiento de PVC de 1 ½"
1	pza.	Tapón hembra PVC de 1 ½" (sin rosca)
1	pza.	Reductor ½" a ¼"
1	pza.	Tee de ½"
1	pza.	Manómetro (entrada ¼")
3	pza.	Cinta teflón
1	pza.	Pegamento para tubos y accesorios de PVC
8	m	Manguera de goma de 1"
12	m	Manguera de goma de ½"

Fuente: Elaboración propia

Todos los materiales fueron adquiridos de una ferretería local. En el anexo D se describe a detalle las características y el costo de cada uno de ellos.

3.1.2. Construcción del prototipo de bomba de ariete.

Después de llevar a cabo una exhaustiva investigación en recursos en línea sobre cómo construir un prototipo de bomba de ariete y adquirir los materiales necesarios, se procedió al ensamblaje de los componentes mencionados anteriormente siguiendo detalladas guías de videos y manuales constructivos disponibles para garantizar un armado preciso y adecuado del prototipo.

Es importante verificar que todas las conexiones estén adecuadamente ajustadas y selladas con cinta de teflón o pegamento, según se requiera, con el fin de prevenir posibles fugas.

La descripción para la construcción del prototipo funcional de bomba de ariete de 1" se detalla en el anexo D.

3.1.3. Prueba del prototipo de ariete hidráulico.

3.1.3.1. Sitio de prueba.

Las pruebas de funcionamiento del prototipo de bomba de ariete fueron realizadas en las cascadas de Coimata en el departamento de Tarija. Las coordenadas del sitio de pruebas son:

Latitud: 21°29'40.98"S

Longitud: 64°48'35.05"W



Figura N° 3.1. Sitio de prueba del prototipo de ariete hidráulico.
Fuente: Google Earth Pro.

El lugar fue elegido debido a que su acceso sencillo facilitaba el transporte de los materiales y componentes requeridos; la instalación y el funcionamiento del ariete resultaron altamente factibles dada la presencia de una caída de agua adecuada y un caudal óptimo.

Una vez seleccionado el sitio de emplazamiento, ubicado en una sección del río que verificamos cumpla con los requisitos hidráulicos necesarios, con un desnivel que permitiera el funcionamiento del prototipo, se determinó situar el ariete hidráulico en una superficie rocosa plana cerca de la ribera del río.

Este emplazamiento fue elegido por su conveniencia, fácil acceso, terreno estable y seguro, sin interferencias externas. Además, se consideró que el caudal desechado por la bomba durante su operación fuese devuelto al río para minimizar el impacto ambiental en el entorno.

3.1.3.2. Pruebas de funcionamiento.

El proceso comienza con la captación directa de agua desde el río mediante un conducto de alimentación, el cual cuenta con un filtro ubicado en su entrada. Este ingreso se encuentra a una elevación superior a la posición de la bomba de ariete. La energía potencial del agua se convierte en energía cinética al descender por la manguera de suministro. El flujo de agua atraviesa el cuerpo del ariete a gran velocidad y llega a la válvula de impulso. La acción de apertura y cierre de esta válvula genera sobrepresiones conocidas como golpes de ariete, lo que resulta en el bombeo de una parte del agua a través de la tubería de descarga hacia una altura superior a la ubicación de la entrada inicial.

Con las pruebas de funcionamiento realizadas se puede comprender el funcionamiento básico de las bombas hidráulicas, los componentes que intervienen en su operación, los parámetros relevantes que deben considerarse y el proceso completo de funcionamiento. Además, nos proporciona una visión completa de cómo se aprovechan los golpes de ariete para bombear parte del agua a una altura superior. Esto nos permite apreciar mejor la ingeniería detrás de estos dispositivos.

3.1.4. Datos obtenidos de la prueba en campo.

Inicialmente se midió la altura de alimentación, una vez puesta en funcionamiento la bomba se midió la altura de descarga.

Se cronometró el tiempo que demoraba en llenarse un recipiente de 50 litros, ambos valores nos permitirán el cálculo del caudal de suministro. El caudal de descarga fue medido utilizando un recipiente de 0,7 litros, de igual manera se cronometró el tiempo en que el recipiente tardo en llenarse.

Los datos obtenidos de la prueba de funcionamiento del prototipo de ariete hidráulico de 1” se muestran en la tabla 3.2 y tabla 3.3.

Tabla N° 3.2. Datos máximos obtenidos de la prueba en campo del prototipo de 1”.

Parámetro		Valor	Unidad
Altura de alimentación	H_a	1,8	m
Altura de descarga	H_d	9,83	m
Volumen de entrada	V_Q	50	l
Tiempo de entrada	t_Q	120	s
Volumen de salida	V_q	0,7	l
Tiempo de salida	t_q	75	s
Golpes por minuto	n	42	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.3. Detalle de datos obtenidos de la prueba en campo prototipo de 1”.

Presión (psi)	Altura (m)	Volumen (l)	Tiempo (s)	Golpes por minuto
3,3	2,319	0,7	23	45
5	3,514	0,7	30	45
7	4,920	0,7	45	45
10	7,028	4	294	42
12	8,434	0,7	64	42
14	9,840	0,7	75	42

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5. Resultados.

Los resultados de caudales obtenidos de la prueba de funcionamiento del prototipo de bomba de ariete puesto en funcionamiento en Coimata se muestran en la tabla 3.4.

Tabla N° 3.4. Resultados de la prueba de funcionamiento del prototipo de 1”.

Parámetro	Unidad	Valor medido
Caudal de alimentación	l/min	25
Caudal elevado a altura máxima	l/min	0,56

Presión (psi)	Altura de descarga (m)	Caudal bombeado		Golpes por minuto
		(l/s)	(l/min)	
3,3	2,319	0,030	1,83	45
5	3,514	0,023	1,40	45
7	4,920	0,016	0,93	45
10	7,028	0,014	0,82	42
12	8,434	0,011	0,66	42
14	9,840	0,009	0,56	42

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos medidos en campo (Altura de alimentación, altura de descarga, caudal de alimentación) se realizó el cálculo del caudal de descarga aproximado empleando una fórmula matemática que depende del rendimiento. En el anexo D se detalla el cálculo.

3.2. Bomba de ariete comercial. Prueba en campo.

3.2.1. Selección de bomba de ariete.

En países como Ecuador, Perú, Colombia, etc. existen gran cantidad de fabricantes de bombas de ariete que ofrecen una variedad de modelos diseñados para adaptarse a diferentes necesidades y condiciones de aplicación, algunos fabricantes han desarrollado modelos de bombas de ariete que han sido ampliamente estudiados y probados, estos suelen realizar rigurosas pruebas de laboratorio y campo de las que obtienen datos precisos sobre su rendimiento bajo diversas condiciones operativas lo que les permite elaborar y proporcionar tablas de capacidades de bombeo detalladas, entre ellos el Ing. Germán Gutiérrez, fabricante de bombas de ariete “Hidroaxon” en Perú. Sin embargo, no todos los modelos de bombas de ariete cuentan con este nivel de documentación. Muchos dispositivos, especialmente aquellos fabricados artesanalmente o por pequeñas empresas, que fueron fabricados y operan de manera empírica, basándose en la experiencia y ensayos de prueba y error; no todos los fabricantes de bombas de ariete disponen de tablas detalladas de capacidades de bombeo.

En este contexto, las pruebas experimentales y la recopilación de datos propios se vuelven esenciales para evaluar y mejorar el rendimiento de las bombas de ariete.

Entre los fabricantes de bombas de ariete se encuentra el Sr. Mario Soliz, propietario de la Metalúrgica San José, quien ha dedicado parte de su tiempo y trabajo a fabricar bombas de ariete en Tarija e instalarlas a nivel local y nacional. Estas bombas son fabricadas

artesanalmente por lo que no se dispone de cuadros de capacidades de bombeo como tal, sin embargo, se presentan los modelos de bombas de ariete y datos que fueron obtenidos en instalaciones realizadas por el Sr. Mario Soliz (Ver tabla 3.5).

Tabla N° 3.5. Referencial de capacidades de bombeo “Bombas de ariete. Metalúrgica San José”.

Número de válvulas de impulso	Tamaño			Altura de suministro (m)	Altura de descarga (m)	Distancia de descarga (m)	Caudal de alimentación (l/min)	Caudal de descarga (l/min)
	Diam. Cuerpo del ariete	Diámetro tubería de alimentación.	Diámetro tubería de descarga.					
Ariete monopulsor	4"	3"	1"	4	30	550	150	2,5
Ariete multipulsor (2 válvulas)	4"	2"	3/4"	5	50	240	180	3,5
	4"	2"	1/2"	2	22	400	90	1,5

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Mediciones en campo. Bomba de ariete de 4”.

3.2.2.1. Localización de la bomba.

La bomba de ariete hidráulico objeto de estudio se encuentra instalada en la propiedad del Sr. Mario Soliz, situada en la comunidad Cabecera El Nueve, en la localidad de Bermejo, Tarija. Este emplazamiento está estratégicamente seleccionado para aprovechar el flujo continuo de agua proveniente de un arroyo cercano, la instalación de la bomba en su propiedad se realizó con el propósito de bombear agua para el riego de sus plantas de naranja, limón, pomelo, palta, entre otras.

Las coordenadas del punto donde se encuentra instalada la bomba de ariete son:

Latitud: 22° 40' 25,61" S

Longitud: 64° 20' 21,24" O

Altitud: 564,5 msnm.

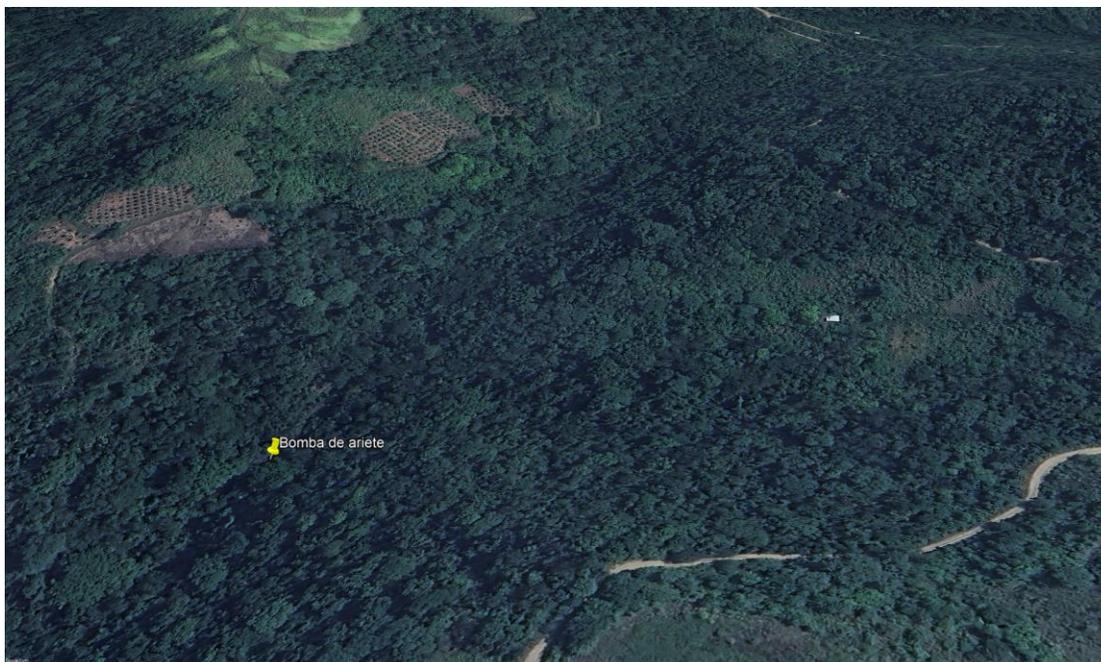


Figura N° 3.2. Ubicación de la bomba de ariete de 4".
Fuente: Google Earth Pro.

3.2.2.2. Dimensiones de la bomba y parámetros iniciales.

El dispositivo en estudio es un ariete hidráulico multipulsor, caracterizado por su configuración que incluye dos válvulas de impulsión.

Inicialmente, se midieron las dimensiones de la bomba de ariete, las cuales fueron cuidadosamente registradas para proporcionar una base precisa para las pruebas y análisis posteriores. Estas mediciones se detallan en la tabla 3.6.

Tabla N° 3.6. Dimensiones de la bomba de ariete.

Componente	Dimensión
Diámetro de la tubería de alimentación	2 pulgadas
Diámetro de entrada a la bomba	2 pulgadas
Diámetro del cuerpo de la bomba	4 pulgadas
Diámetro de las válvulas de impulsión.	3 pulgadas
Diámetro de la válvula de retención	3 pulgadas
Diámetro de la cámara de aire	4 pulgadas
Longitud de la cámara de aire	0,95 metros
Diámetro de la tubería de descarga	¾ pulgadas

Fuente: Elaboración propia.

Además de medir las dimensiones de los componentes de la bomba de ariete, se registraron los datos de otros parámetros operativos esenciales, que se detallan a continuación:

- Altura de alimentación

$$H_a = 5,1 \text{ m}$$

- Caudal de alimentación

$$Q = 3,33 \text{ l/s}$$

- Longitud de tubería de entrada

$$L = 28,2 \text{ m}$$

3.2.2.3. Curva característica.

Los datos obtenidos se recopilaban variando la altura de descarga y registrando el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de 10 litros en cada punto de elevación, así como los golpes por minuto. Este procedimiento se realizó en cinco puntos de elevación distintos.

Posteriormente, se realizó una variación reduciendo en el peso añadido a las válvulas de impulso (procurando no comprometer la eficiencia del sistema) y se repitió el procedimiento descrito anteriormente en cada punto de elevación.

Se realizaron varias mediciones de tiempo y volumen en cada altura, tres para ser específicos, para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos, ya que existen múltiples factores que pueden introducir errores en las mediciones individuales. Entre estos factores se incluyen fluctuaciones en el flujo de agua, posibles errores humanos o instrumentales durante el proceso de medición. Al tomar múltiples lecturas, es posible identificar y minimizar el impacto de estas variaciones, permitiendo obtener un promedio más representativo del caudal real.

Los datos obtenidos se presentan en las tablas 3.7 y 3.8.

Tabla N° 3.7. Datos obtenidos a diferentes alturas con W_1 . Ariete de 4".

Cota	Altura respecto a la bomba (m)	Longitud respecto a la bomba (m)	Volumen (l)	Tiempo (seg)				Golpes por minuto
				Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	
589	24,5	140	10	85	82	82	83	28
594,6	30,1	140	10	92	92	93	92,333	27
603,2	38,7	240	10	148	148	148	148	24
606,5	42,0	240	10	153	154	154	153,667	24
611,3	46,8	240	10	165	168	167	166,667	22

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.8. Datos obtenidos a diferentes alturas con W_2 . Ariete de 4".

Cota	Altura respecto a la bomba (m)	Longitud respecto a la bomba (m)	Volumen (l)	Tiempo (seg)				Golpes por minuto
				Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	
589	24,5	140	10	115	120	120	118,333	53
594,6	30,1	140	10	126	127	126	126,333	53
603,2	38,7	240	10	232	232	233	232,333	50
606,5	42,0	240	10	253	253	253	253	49
611,3	46,8	240	10	328	329	329	328,667	47

Fuente: Elaboración propia.

En base a las tablas 3.7 y 3.8 se calcula el caudal de descarga a diferentes alturas en ambas configuraciones, ver los resultados de este cálculo en la tabla 3.9. A partir de esta última se graficarán las curvas Altura-Caudal de descarga y Altura-Golpes por minuto.

Tabla N° 3.9. Resultados de prueba en campo. Ariete hidráulico de 4".

Altura de descarga (m)	W_1		W_2	
	q_1 (l/s)	Golpes por minuto	q_2 (l/s)	Golpes por minuto
24,5	0,1205	28	0,0845	53
30,1	0,1083	27	0,0792	53
38,7	0,0676	24	0,0430	50
42,0	0,0651	24	0,0395	49
46,8	0,0600	22	0,0304	47

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Bomba de ariete comercial. Cálculos teóricos.

3.3.1. Consideraciones preliminares.

3.3.1.1. Altura de entrega o descarga:

$$H_d = 46,8m$$

3.3.1.2. Cálculo de la altura de alimentación o suministro:

Para calcular la altura haremos uso de la ecuación (5).

$$H_a = \frac{1}{10} H_d$$

$$H_a = \frac{1}{10} (46,8)$$

$$H_a = 4,68 m$$

La altura medida en campo es:

$$H_a = 5,10 m$$

Esta altura está dentro de los límites establecidos por (Martínez D., 2013):

$$1m \leq 5,10m \leq 20m$$

3.3.1.3. Cálculo de la longitud de la tubería de suministro:

Considerando la altura de suministro 5,1 metros se calcula la longitud aproximada de la tubería de alimentación, aplicando la ecuación (7).

$$L = 4H_a$$

$$L = 4(5,1)$$

$$L = 20,40 m$$

La longitud de la tubería de alimentación (distancia inclinada desde la fuente de almacenamiento hasta la bomba de ariete en estudio) medida en campo es 28,2 metros, debiéndose esta magnitud a las condiciones de terreno.

La longitud está dentro de los límites:

$$10m \leq 28,2m \leq 30m$$

Romero Guerrero y Lorenzo Gutiérrez, en sus investigaciones afirman que el ángulo debe estar entre 10° y 45° , por lo tanto, procederemos al cálculo del ángulo que forma la tubería de suministro con el terreno aplicando la ecuación (6)

$$\text{Sen}\alpha = \frac{H_a}{L} = \frac{5,1}{28,2}$$

$$\alpha = 10,42^\circ$$

3.3.1.4. Elección de la tubería de suministro.

Posterior al cálculo de la longitud de la tubería de suministro, procedemos al cálculo del diámetro de la tubería de suministro, para esto haremos uso de la ecuación (8).

$$\frac{L}{D} = 500 \qquad \frac{L}{D} = 150$$

$$D = \frac{28200}{500} = 56,4\text{mm}$$

$$D = \frac{28200}{150} = 188\text{mm}$$

El diámetro de la tubería de suministro con la que trabaja la bomba de ariete del Sr. Mario Soliz es de 2 pulgadas (50,8mm), el diámetro empleado no está dentro de los límites establecidos.

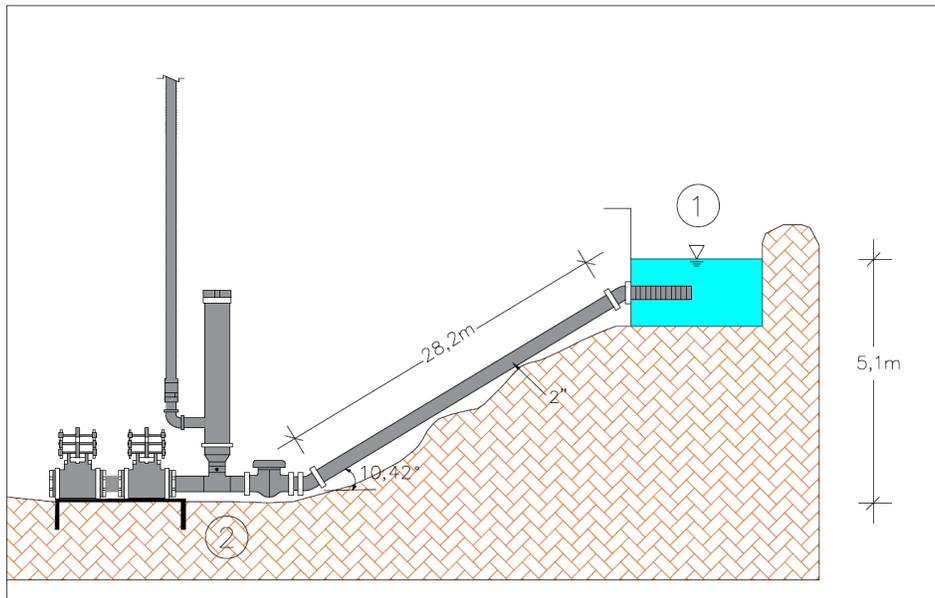


Figura N° 3.3. Dimensiones de la tubería de alimentación.

Fuente: Elaboración propia.

El material del conducto de suministro es una tubería galvanizada TUPY, clase normal, Serie (Schedule) 40, esta elección se hizo con el propósito de darle rigidez a la tubería. Para mayor detalle sobre la tubería empleada ver Anexo C.

3.3.1.5. Cálculo de la tubería de descarga.

Para determinar el diámetro de la tubería de descarga utilizaremos la ecuación (9).

$$d = \frac{D}{4} a \frac{D}{2}$$

$$d = \frac{2''}{4} = 1/2''$$

$$d = \frac{2''}{2} = 1''$$

El conducto de descarga es una manguera de 3/4", opción adquirida por motivos de costos, es decir, para optimizar gastos, ya que una tubería PVC tiene un precio más elevado.

3.3.2. Cálculo del caudal de suministro.

Para determinar el caudal de suministro primero calcularemos el tipo de régimen de trabajo, ya que esto determinará que ecuación debemos elegir para el cálculo. Así mismo, se calcularán las pérdidas por fricción y pérdidas locales, ya que el caudal de suministro está en función de estas variables.

3.3.2.1. Determinación del tipo de régimen.

Para fines de cálculo usualmente se asume que la velocidad del fluido es de 1,5 m/s.

La temperatura media en Bermejo es de 22,7°C, por lo tanto, su viscosidad cinemática es de $0,94 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. (ver anexo C).

Sustituyendo estos datos en la ecuación (14) obtenemos:

$$Re = \frac{v * D}{\nu}$$

$$Re = \frac{1,5 * 0,05641}{0,94 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 90015,957$$

El número de Reynolds obtenido nos indica que el flujo es de régimen turbulento.

3.3.2.2. Cálculo de la rugosidad relativa.

Para el cálculo de la rugosidad relativa tomaremos como dato la rugosidad absoluta de una tubería de acero galvanizado, cuyo valor es de 0,15mm.

Reemplazando este valor en la ecuación (16) obtenemos:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D}$$
$$\varepsilon_r = \frac{0,00015}{0,05641}$$
$$\varepsilon_r = 2,659 \times 10^{-3}$$

3.3.2.3. Cálculo del factor de fricción.

Para el cálculo del factor de fricción haremos uso de la ecuación (18), emplearemos los valores de la rugosidad relativa y del número de Reynolds obtenidos anteriormente.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2,659 \times 10^{-3}}{3.7} + \frac{2,51}{90015,957 * \sqrt{f}} \right)$$
$$f = 2,685 \times 10^{-2} \approx 0,027$$

Otra manera de calcular el factor es usando el diagrama de Moody (ver anexo C). De ahí se obtiene que el valor del factor de fricción es:

$$f = 0,027$$

3.3.2.4. Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería de suministro.

Para determinar el valor de las pérdidas por fricción en la tubería de alimentación se asume la velocidad de 1,6 m/s demostrada por M. Hadzich en sus instalaciones experimentales.

Conociendo la velocidad del agua que transita en la tubería, el diámetro y la longitud de la tubería y el factor de fricción, reemplazamos en la ecuación (19).

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0,027 * \frac{28,2}{0,05641} * \frac{1,6^2}{2 * 9,81}$$

$$hf = 1,761 \text{ m}$$

Ahora procedemos al cálculo del caudal de suministro, teniendo en cuenta que el régimen de trabajo es turbulento, aplicaremos la ecuación (23):

$$Q = -2,2148\pi \sqrt{\frac{D^5 h_f}{L}} \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{0,5666v}{D^{1,5}} * \sqrt{\frac{L}{h_f}} \right)$$

$$Q = -2,2148\pi \sqrt{\frac{0,05641^5 * 1,761}{28,2}} \log_{10} \left(\frac{2,659 \times 10^{-3}}{3,7} + \frac{0,5666 * 0,94 \times 10^{-6}}{0,05641^{1,5}} * \sqrt{\frac{28,2}{1,761}} \right)$$

$$Q = 4,017 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 4,017 \text{ l/s}$$

3.3.3. Determinación de los coeficientes locales.

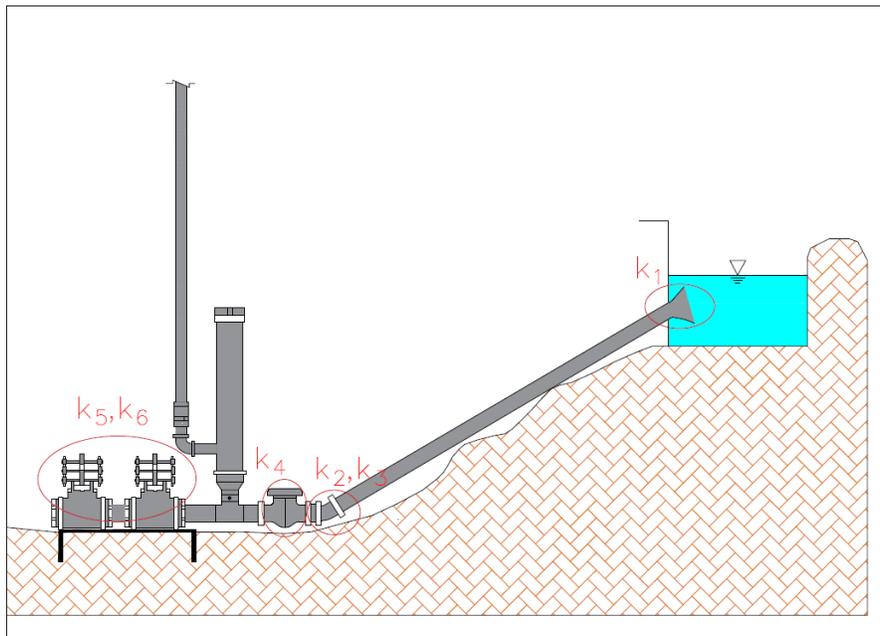


Figura N° 3.4. Pérdidas locales de la instalación.
Fuente: Elaboración propia.

Los coeficientes de resistencia locales se determinan según la tabla que se muestra en el Anexo C.

$k_1 = 0,03 - 0,1$ (Entrada de la tubería redondeada, ligeramente redondeada).

$k_2 = 0,21$ (Codo de 45° suave).

$k_3 = 0,5625$ (Ensanchamiento repentino)

$k_4 = 0,11 - 0,12$ (Válvula de compuerta)

$k_5 = k_6 = 7,07$ (Válvulas de impulso)

$$\sum k = 0,1 + 0,21 + 0,5625 + 0,12 + 7,07 = 8,063$$

El cálculo del coeficiente de pérdidas de las válvulas de impulsión se determinará aplicando la ecuación (40), donde s es la carrera de la válvula, $s = 0,30$ pulg (7 mm). Esta formulación es aplicable para las válvulas que estén dentro este rango de peso 0.1 a 0.8 Kg.

$$R_s = \frac{2,43 - 1,06s + 10^{(0,95-13,30s)}}{s}$$

$$R_s = \frac{2,43 - 1,06(0,3) + 10^{(0,95-13,30*0,3)}}{0,3} = 7,07$$

3.3.4. Cálculo del caudal necesario para abastecer el ariete hidráulico.

El caudal necesario para abastecer el ariete hidráulico será la suma del caudal que sale por cada válvula de impulso (Ver figura 3.5).

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

Para determinar el caudal haremos uso de la ecuación (26), la cual la expresaremos en función del caudal.

$$v = \sqrt{\frac{2 * g * H_a}{1 + f * \frac{L}{D} + \sum k}}$$

$$Q_T = A_T * \sqrt{\frac{2 * g * H_a}{1 + f * \frac{L}{D} + \sum k}} \quad (51)$$

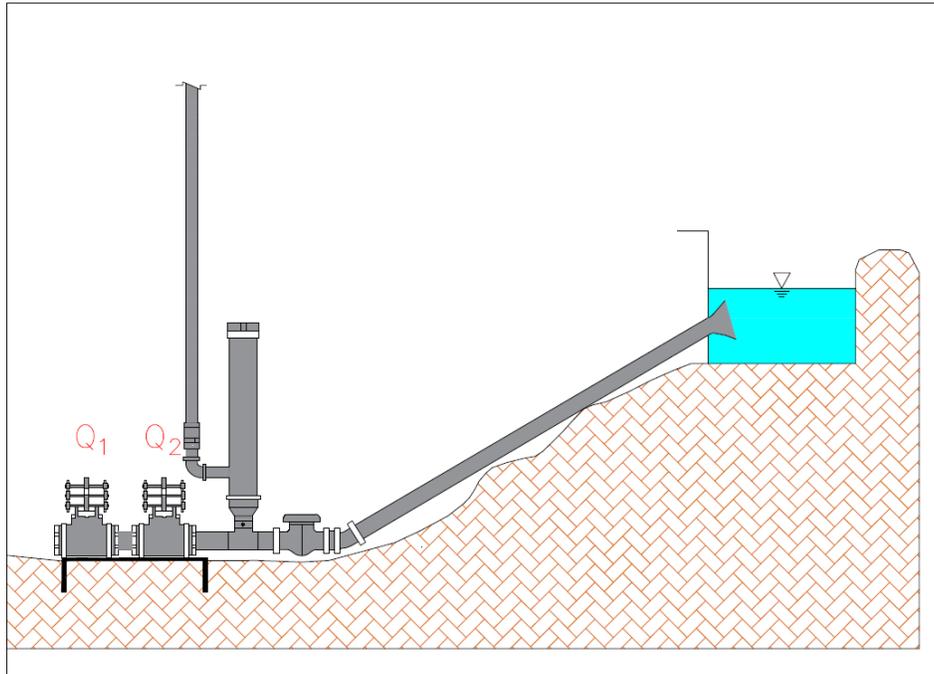


Figura N° 3.5. Caudal necesario para alimentar el ariete hidráulico.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora procedemos a calcular el área total de salida de las válvulas de impulso, para esto debemos tener en cuenta que ambas válvulas son iguales; por lo tanto, el área total de salida se calculará hallando el área de salida de una válvula multiplicada dos veces.

$$A_T = A_1 + A_2$$

$$A_T = 2 * A_1$$

En la figura 3.6. se muestra el área de salida de la válvula de impulso (área sombreada), el vástago es de 3/8" y el diámetro de salida de cada orificio es 5/8", esta área se calcula de la siguiente manera:

$$A_1 = 6 * \left(\frac{\pi * 0,0159^2}{4} \right) = 1,191 \times 10^{-3} m^2$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{A_1 * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,191 \times 10^{-3} * 4}{\pi}} = 3,894 \times 10^{-2} m$$

$$A_T = 2 * 1,191 \times 10^{-3}$$

$$A_T = 2,383 \times 10^{-3} m^2$$

$$A_T = \frac{\pi * D_T^2}{4} \rightarrow D_T = \sqrt{\frac{4A_T}{\pi}}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * 2,383 \times 10^{-3}}{\pi}}$$

$$D_T = 5,508 \times 10^{-2} m$$

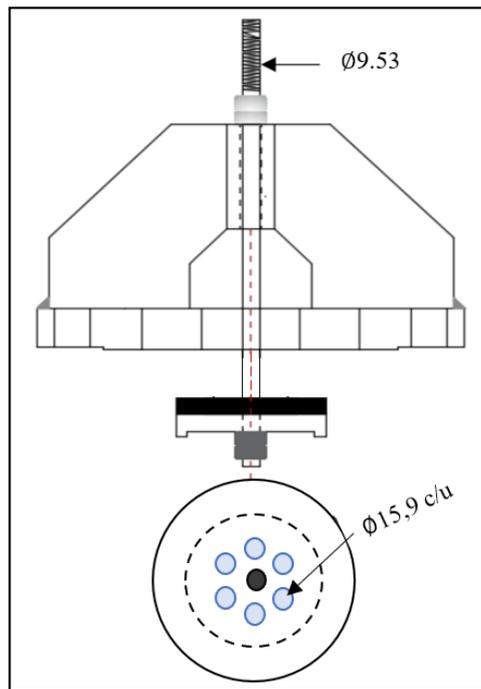


Figura N° 3.6. Área de salida de la válvula de impulso
Fuente: Chero A., 2018.

Ahora procedemos a reemplazar los datos obtenidos en la ecuación (51).

$$Q_T = A_T * \sqrt{\frac{2 * g * H_a}{1 + f * \frac{L}{D} + \sum k}}$$

$$Q_T = 2,383 \times 10^{-3} * \sqrt{\frac{2 * 9,81 * 5,1}{1 + 0,027 * \frac{28,2}{5,508 \times 10^{-2}} + 8,063}}$$

$$Q_T = 4,98 \times 10^{-2} m^3/s$$

En conclusión, se requiere un caudal de $4.98 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ para alimentar un ariete hidráulico de dos válvulas.

3.3.5. Cálculo de la velocidad en las válvulas de impulso.

Para el cálculo de la velocidad usaremos la ecuación (26).

$$v = \sqrt{\frac{2 * g * H_a}{1 + f * \frac{L}{D} + \sum k}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 * 9,81 * 5,1}{1 + 0,027 * \frac{28,2}{3,894 \times 10^{-2}} + 8,063}}$$

$$v = 1,87 \text{ m/s}$$

Siendo 1,87 m/s la velocidad máxima en las válvulas de impulsión.

3.3.6. Tiempo de duración de un periodo.

Para este cálculo se emplearán los tiempos hallados en prácticas realizadas por J. A. Eytelwein, en donde el tiempo de aceleración es de 0,9 segundos, el tiempo de bombeo es de 0,052 segundos y el tiempo de retroceso es de 0,048 segundos. El periodo se calcula reemplazando estos valores en la ecuación (1).

$$T = T_a + T_d + T_r$$

$$T = 0,9 + 0,052 + 0,048$$

$$T = 1 \text{ s.}$$

3.3.7. Cálculo del caudal total en un ciclo.

Aplicaremos las ecuaciones (3) y (4) para determinar el caudal de bombeo (q_b) y el caudal derramado (Q_p) por las válvulas de impulso.

3.3.7.1. Cálculo del caudal de desecho en un ciclo de trabajo.

Para determinar el caudal desechado se tomará en cuenta el área de salida de las dos válvulas.

$$Q_p = \frac{1}{T} * \frac{\pi D^2}{4} \left[\int_0^{T_a} v(t) dt + \int_{T_a+T_d}^{T_a} v(t) dt \right]$$

$$Q_p = \frac{1}{T} * 2 * \frac{\pi D^2}{4} \left[\int_0^{T_a} v(t) dt + \int_{T_a+T_d}^{T_a} v(t) dt \right]$$

$$Q_p = \frac{1}{1} * 2 * \frac{\pi(3,894 \times 10^{-2})^2}{4} \left[\int_0^{0,9} 1,87 dt + \int_{0,9+0,052}^{0,9} 1,87 dt \right]$$

$$Q_p = 3,777 \times 10^{-3} m^3 / ciclo$$

3.3.7.2. Cálculo de bombeo en un ciclo de trabajo.

Para calcular el caudal de bombeo se tomará en cuenta el área de entrada de la válvula check, esta área es la misma que la de la válvula de impulso debido a que también tiene 6 orificios de 15,9 mm.

$$q_b = \frac{1}{T} * \frac{\pi D^2}{4} \int_{T_a}^{T_a+T_d} v(t) dt$$

$$q_b = \frac{1}{1} * \frac{\pi(3,894 \times 10^{-2})^2}{4} \int_{0,9}^{0,9+0,052} 1,87 dt$$

$$q_b = 1,158 \times 10^{-4} m^3 / ciclo$$

Ahora procedemos a calcular los metros cúbicos consumido por el ariete en un ciclo de trabajo, utilizaremos la ecuación (2).

$$Q = Q_p + q_b$$

$$Q = 3,777 \times 10^{-3} + 1,158 \times 10^{-4}$$

$$Q = 3,892 \times 10^{-3} m^3 / ciclo$$

3.3.8. Cálculo de la presión dinámica.

Se calculará la presión dinámica en las válvulas con la ecuación (41).

$$P = \frac{v^2}{2} * \rho$$

$$P = \frac{1,87^2}{2} * 997,6$$

$$P = 1744,25 \frac{kg}{m * s^2} = 1744,25 Pa$$

3.3.9. Cálculo de la energía cinética.

La energía cinética es el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de masa en reposo hasta la velocidad indicada, es decir, es la energía que posee un cuerpo en movimiento. Cuanto mayor es la cantidad de agua que fluye en la tubería de alimentación, mayor es la energía de choque.

La energía cinética y con ella la capacidad de bombeo depende de la altura de alimentación y la cantidad de agua en el conducto de impulsión.

Calculamos la masa de agua en la tubería de alimentación. Donde $t = 1$ s.

$$m = Q * \rho * t$$

La energía cinética disponible es:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2$$

$$E_c = \frac{Q * \rho * v^2}{2}$$

$$E_c = \frac{4,017 \times 10^{-3} * 997,6 * 1 * 1,87^2}{2}$$

$$E_c = 7,01 \text{ kg} * \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 7,01 \text{ N} * \text{m} = 7,01 \text{ J}$$

3.3.10. Cálculo de las pérdidas en la tubería de descarga o conducto vertical.

3.3.10.1. Cálculo de las pérdidas por fricción en el conducto vertical.

Con el diagrama de Moody obtenemos el factor de fricción donde f es 0,025. Para el cálculo de las pérdidas por fricción utilizaremos la ecuación (19):

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$hf = 0,025 * \frac{240}{0.01905} * \frac{1^2}{2 * 9,81}$$

$$hf = 16,05 \text{ m}$$

Siendo la velocidad 1 m/s asumida para el cálculo.

3.3.10.2. Cálculo de las pérdidas locales en el conducto vertical.

$k = 0,11 - 0,12$ (Válvula de compuerta)

$$h_{loc} = k \frac{v^2}{2 * g}$$

$$h_{loc} = 0,12 \frac{1^2}{2 * 9,81}$$

$$h_{loc} = 6,12 \times 10^{-3} m$$

3.3.11. Cálculo de la altura de desarrollo del ariete.

Se aplicará la ecuación (29).

$$H_i = H_d + h_f + h_{loc}$$

$$H_i = 46,8 + 16,05 + 6,12 \times 10^{-3}$$

$$H = 62,86 m$$

3.3.12. Cálculo de fenómenos físicos involucrados en el ariete hidráulico.

3.3.12.1. Cálculo de la celeridad de la onda de presión.

La celeridad o velocidad de propagación de la onda de presión se calcula mediante la ecuación (32).

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_0}{\rho}}{1 + \frac{E_0 D}{E \delta}}}$$

$$a = \sqrt{\frac{\frac{2,2 \times 10^9}{997,6}}{1 + \frac{2,2 \times 10^9 * 0,05641}{2,1 \times 10^{11} * 0,00391}}}$$

$$a = 1384,10 m/s$$

La velocidad a la que una onda de presión se propaga en un sistema de tuberías, considerando tanto las propiedades del agua como del material de la tubería (acero) es 1384,10 m/s.

3.3.12.2. Cálculo del tiempo de cierre de la válvula.

Para calcular el tiempo de cierre de la válvula utilizaremos la ecuación (32).

$$T = \frac{2L}{a}$$

$$T = \frac{2 * 28,2}{1384,10}$$

$$T = 4,07 \times 10^{-2} \text{ s}$$

Determinamos que el cierre es rápido porque $t_c < T = \frac{2L}{a}$, siendo el tiempo de cierre de la válvula $t_c = 0,01 \text{ s}$. Para la medición del tiempo de cierre de la válvula de impulso se consideró los ensayos realizados en la Pontificia Universidad Católica de Perú.

3.3.12.3. Cálculo del pulso de Joukowsky (Zhukovski).

La sobrepresión que se produce dentro del cuerpo del ariete se calcula con la ecuación (31):

$$\Delta p = \rho a v$$

$$\Delta p = 997,6 * 1384,10 * 1,87$$

$$\Delta p = 2582055,16 \text{ Pa} = 2,582 \text{ MPa}$$

En nuestro caso como el cierre es rápido, la sobrepresión generada por el golpe de ariete se calcula con la ecuación (34).

$$\Delta H = \frac{v * a}{g}$$

$$\Delta H = \frac{1,87 * 1384,10}{9,81}$$

$$\Delta H = 263,840 \text{ m}$$

Calcularemos la presión máxima utilizando la ecuación (43), pero antes se debe determinar la carga máxima en la instalación.

$$H_{max} = H_a + \Delta H$$

$$H_{max} = 5,1 + 263,840$$

$$H_{max} = 268,94 \text{ m}$$

La presión máxima en la instalación es:

$$P_{max} = \rho * g * H_{max}$$

$$P_{max} = 997,6 * 9,81 * 268,94$$

$$P_{max} = 2631969,48 \frac{kg}{m * s^2} = 2631969,48 Pa = 2,63 MPa$$

Para determinar la presión mínima se utiliza la ecuación (44), pero antes se calculará la carga mínima en la instalación:

$$H_{min} = H_a - \Delta H$$

$$H_{min} = 5,1 - 263,84$$

$$H_{min} = -258,74 m$$

La presión máxima en la instalación es:

$$P_{min} = \rho * g * H_{max}$$

$$P_{min} = 997,6 * 9,81 * 245.336$$

$$P_{min} = 2532147,62 \frac{kg}{m * s^2} = 2532147,62 Pa = 2,53 MPa$$

3.3.13. Cálculo del coeficiente de arrastre de la válvula de impulso.

Calculamos el coeficiente de arrastre de la válvula de impulso con la ecuación (38):

$$C_d = \frac{0,345 - 0,275 s + 10^{0,52-6,85s}}{s}$$

$$C_d = \frac{0,345 - (0,275 * 0,3) + 10^{0,52-(6,85*0,3)}}{0,3}$$

$$C_d = 0,97$$

3.3.14. Cálculo de la fuerza hidráulica sobre la válvula de impulsión.

La fuerza de arrastre que se ejerce sobre la cara inferior de la válvula, en el momento en que está válvula empieza a cerrarse, está dada por la ecuación (37):

$$F_d = C_d * \left(\frac{\rho * v_o^2}{2} \right) * A_d$$

$$F_d = 0,97 * \left(\frac{997,6 * 1,87^2}{2} \right) * \left(\frac{\pi * (0,08)^2}{4} \right)$$

$$F_d = 8,5 \text{ N} = 0,87 \text{ kgf}$$

3.3.15. Cálculo del peso para la válvula de impulso.

Para el cálculo del peso máximo de la válvula utilizaremos la ecuación (42):

$$0 < w < \frac{A_d * H_a * \rho * C_d}{M}$$

Donde el peso máximo de la válvula de impulso será:

$$w_{max} = \frac{(\pi * 0,04^2) * 5,1 * 997,6 * 0,97}{0,027 * \frac{28,2}{3,894 * 10^{-2}} + 8,063}$$

$$w_{max} = 0,89 \text{ kg}$$

El peso de la válvula debe ser menor al peso máximo para que la fuerza de arrastre pueda elevar la válvula de impulso, por lo tanto, el peso de la válvula debe estar en el siguiente intervalo:

$$0 < w < w_{max}$$

Ahora procedemos a calcular el peso de la válvula de impulso:

- Peso del pie de la válvula.

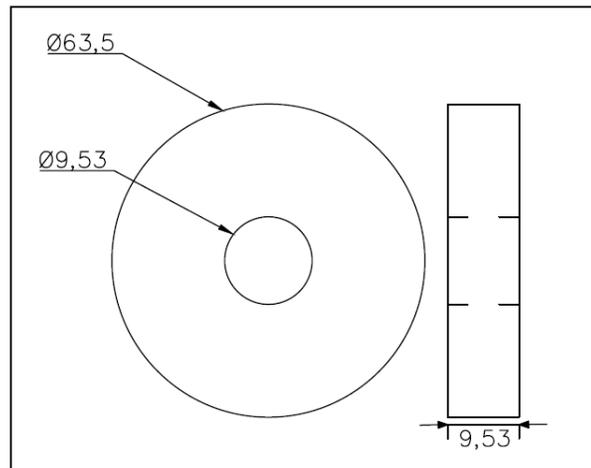


Figura N° 3.7. Dimensiones del pie de la válvula de impulso en mm.

Fuente: Elaboración propia.

$$W_{pv} = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$W_{pv} = \pi(R^2 - r^2) * e * \rho_{\text{acero inox.}}$$

$$W_{pv} = \pi(0,03175^2 - 0,004765^2) * 0,00953 * 7980$$

$$W_{pv} = 0,235 \text{ kg}$$

- Peso del vástago.

$$W_v = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$W_v = \frac{\pi * D^2}{4} * l_v * \rho_{\text{acero inox.}}$$

$$W_v = \frac{\pi * 0,00953^2}{4} * 0,282 * 7980$$

$$W_v = 0,161 \text{ kg}$$

- Peso de la pesa.

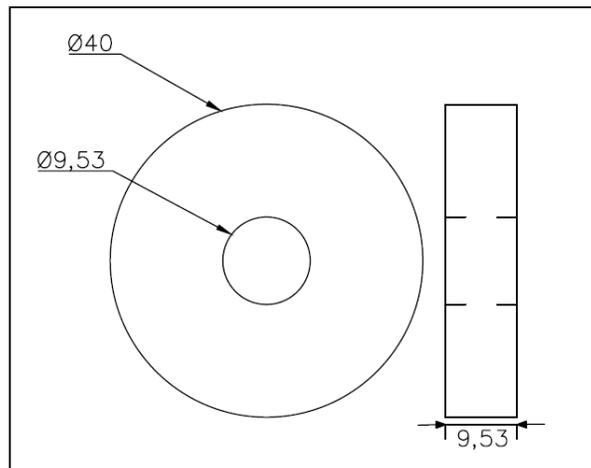


Figura N° 3.8. Dimensiones de la pesa en mm.

Fuente: Elaboración propia.

$$W_p = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$W_p = \pi(R^2 - r^2) * e * \rho_{\text{acero inox.}}$$

$$W_p = \pi(0,02^2 - 0,004765^2) * 0,00953 * 7980$$

$$W_p = 0,09 \text{ kg}$$

- Peso del caucho

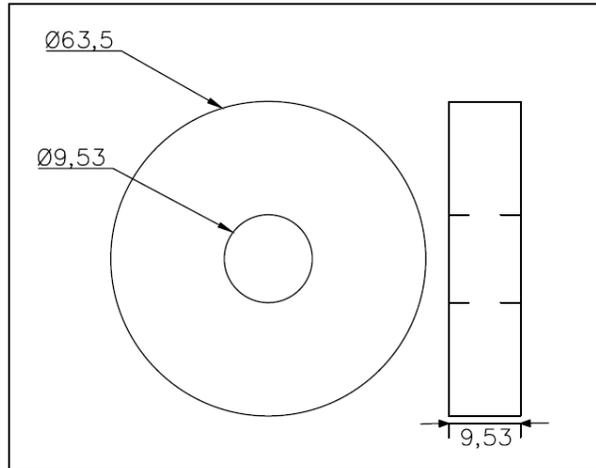


Figura N° 3.9. Dimensiones del caucho en mm.
Fuente: Elaboración propia.

$$W_c = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$W_c = \pi(R^2 - r^2) * e * \rho_{\text{caucho}}$$

$$W_c = \pi(0,03175^2 - 0,004765^2) * 0,00953 * 950$$

$$W_c = 0,028 \text{ kg}$$

El peso total de la válvula de impulso es:

$$W = W_{pv} + W_v + W_p + W_c$$

$$W = 0,235 + 0,161 + 0,09 + 0,028$$

$$W = 0,514 \text{ kg}$$

El peso de la válvula está dentro del rango:

$$0 < 0,514 < 0,89$$

3.3.16. Cálculo de la potencia útil del ariete hidráulico.

La potencia se determina mediante la ecuación (45):

$$Pu = \rho * g * q_b * H_i$$

$$Pu = 997,6 * 9,81 * 1,158 \times 10^{-4} * 62,86$$

$$Pu = 71,23 \text{ W}$$

3.3.17. Cálculo de la potencia recibida.

Para hallar la potencia recibida se hace uso de la ecuación (47):

$$P_b = (Q_p + q_b) * \rho * g * H_a$$
$$P_b = (3,777x10^{-3} + 1,158x10^{-4}) * 997,6 * 9,81 * 5,1$$
$$P_b = 194,293 W$$

3.3.18. Cálculo de la eficiencia.

Con la ecuación (49) analizaremos la eficiencia del ariete hidráulico:

$$\eta = \frac{q_b * H_i}{(Q_p + q_b) * H_a} * 100$$
$$\eta = \frac{1,158x10^{-4} * 62,86}{(3,777x10^{-3} + 1,158x10^{-4}) * 5,1} * 100$$
$$\eta = 36,66\%$$

3.3.19. Cálculo del rendimiento volumétrico.

El rendimiento se calcula con la ecuación (50):

$$\eta_v = \frac{q_b}{(Q_p + q_b)} * 100$$
$$\eta = \frac{1,158x10^{-4}}{(3,777x10^{-3} + 1,158x10^{-4})} * 100$$
$$\eta = 2,97\%$$

3.3.20. Eficiencia y rendimiento volumétrico con valores medidos en campo.

3.3.20.1. Cálculo de la eficiencia.

Con la ecuación (49) analizaremos la eficiencia del ariete hidráulico.

$$\eta = \frac{q_b * H_d}{(Q_p + q_b) * H_a} * 100$$
$$\eta = \frac{0,06 * 46,8}{3,333 * 5,1} * 100$$

$$\eta = 16,51\%$$

3.3.20.2. Cálculo del rendimiento volumétrico.

El rendimiento se calcula con la ecuación (50).

$$\eta_v = \frac{q_b}{(Q_p + q_b)} * 100$$

$$\eta = \frac{0,06}{3,333} * 100$$

$$\eta = 1,80\%$$

3.4. Alternativas de bombeo disponibles en el mercado.

Cada tipo de bomba tiene sus propias ventajas y limitaciones, la elección depende en gran medida de las condiciones locales y de los recursos disponibles. Son diversos los requerimientos y condiciones, resaltando la importancia de un análisis detallado para la toma de decisiones en la implementación de sistemas de bombeo de agua.

Sin embargo, para realizar una comparación entre estas tecnologías se asume la necesidad de bombear agua a una altura de 40 metros y a una distancia de 200 metros, asumiendo que se tiene un almacenamiento de agua constante de 80 m³. Para abordar esta demanda, se exploraron alternativas de bombeo disponibles en el mercado, incluyendo bombas eléctricas, bombas solares y bombas de ariete.

En este contexto, se realizaron cotizaciones, algunas de las alternativas de bombas disponibles en el mercado se muestran a continuación.

En el anexo A se muestran los cuadros de capacidades y las curvas de rendimiento hidráulico de las bombas propuestas.

3.4.1. Bombas de energía eléctrica.

Las electrobombas requieren una fuente de energía eléctrica para su funcionamiento, el suministro debe ser adecuado y estable para que la bomba opere de manera eficiente y continua, sin interrupciones ni daños.

Las alternativas de electrobombas que recomienda la empresa “Luzam” para bombear agua a una altura de 40 metros, 200 metros de distancia, teniendo un almacenamiento de 80 m³ se muestra en la tabla 3.10.

Tabla N° 3.10. Cotización 1 de bomba eléctrica “LEO”.

Descripción del producto	Marca	Código	Cantidad	Unidad	Precio (Bs)
Bomba 1,5HP APm110H 220V H110M Q2	LEO	APm110H	1	pza.	1780,0
Flotador eléctrico mod. FLO-01 CA	LEO	FLO-01	1	pza.	75,0
Guardamotor con mando giratorio	CHINT	NS2-25X/4-6,3A	1	pza.	230,0
Válvula de pie 1" con colador de B	LEO	FVAI	1	pza.	50,0
				Total	2135,0
Tubería PVC de 1”	Tigre	E-40	1	barra	75,0
			34	barras	2550,0
Accesorios (codos, uniones, etc), cables	-	-	-	-	-
				TOTAL	4685,0

Fuente: Elaboración Propia.

Las alternativas de electrobombas que recomienda la empresa “San Rafael” para cumplir la demanda requerida se muestran en la tabla 3.11 y tabla 3.12.

Tabla N° 3.11. Cotización 2 de bomba eléctrica “PEDROLLO”.

Descripción del producto	Marca	Código	Cantidad	Unidad	Precio (Bs)
Electrobomba centrífuga con doble rodete. Motor blindado de 3 HP de alto rendimiento de clase IE3. Trifásico de 380V.50Hz. de industria italiana.	PEDROLLO	2CP25/16A	1	pza.	4900,0
Chupador de bronce de 1¼”	-	CHUPADOR	1	pza.	209,0
Tablero protector de 3HP con disyuntor	-	TABLERO	1	pza.	2330,0
				Total	7439,0

Tubería PVC de 1”	Tigre	E-40	1	barra	75,0
			34	barras	2550,0
Accesorios (codos, uniones, etc), cables	-	-	-	-	-
TOTAL					9989,00

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3.12. Cotización 3 de bomba eléctrica “PEDROLLO”.

Descripción del producto	Marca	Código	Cantidad	Unidad	Precio (Bs)	
Bomba centrifuga mono rodete, con impulsor de bronce, motor blindado de alto rendimiento silencioso, con ventilación externa, apto para servicio continuo, rebobinable de 12,5HP, trifásica, 220-380V.50 Hz.	PEDROLLO	F40/250C	1	pza.	17568,0	
Chupador tipo york 2 ½”	-	CHUPADOR	1	pza.	525,0	
Tablero protector de 12,5HP con disyuntor	-	TABLERO	1	pza.	2954,0	
					Descuento	878
					Total	20169,0
Tubería PVC de 1 ½”	Tigre	E-40	1	barra	115,0	
			34	barras	3910,0	
Accesorios (codos, uniones, etc), cables	-	-	-	-	-	
TOTAL					24079,0	

Fuente: Elaboración Propia.

El consumo energético de las alternativas propuestas se muestra en la tabla 3.13.

Tabla N° 3.13. Consumo anual en Bs. Bombas eléctricas.

Código	Consumo energético	Costo		Consumo			
	(kWh)	(Bs)		(Bs/hr)	(Bs/día)	(Bs/mes)	(Bs/año)
LEO APm110H	1,1	Categoría mínima	0,54	0,59	14,26	427,68	5203,44
		Categoría media	0,95	1,05	25,08	752,40	9154,20
		Categoría mayor	1,28	1,41	33,79	1013,76	12334,08
PEDROLLO 2CP25/16A	2,2	Categoría mínima	0,54	1,19	28,51	855,36	10406,88
		Categoría media	0,95	2,09	50,16	1504,80	18308,40
		Categoría mayor	1,28	2,82	67,58	2027,52	24668,16
PEDROLLO F40/250C	9,2	Categoría mínima	0,54	4,97	119,23	3576,96	43519,68
		Categoría media	0,95	8,74	209,76	6292,80	76562,40
		Categoría mayor	1,28	11,78	282,62	8478,72	103157,76

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Bombas de energía fotovoltaica.

En la tabla 3.14 se muestran algunos de los Kits de bombeo solar que ofrece la empresa RC Solar, constan de la Bomba, el variador y el panel solar.

Tabla N° 3.14. Kits de bombeo solar.

Características		Altura de descarga (m)	Distancia (m)	Caudal de descarga (m ³ /d)	Precio (Bs)
1320W/ SPM31100c025 S	Bomba+Variador+ Panel solar (4 pza)	60	200	14	13742,0
SPM600h/ 920W	Bomba+Variador+ Panel solar (3 pza)	60	200	7	13596,0

Fuente: Elaboración propia.

El kit de bombeo no incluye elementos que se requieren para sistema completo de bombeo solar como: estructura de montaje para sostener los paneles solares, cables adecuados para

conectar los paneles solares entre sí y al variador, tuberías y accesorios de plomería (se necesitan tuberías y accesorios de plomería adecuados para conectar la bomba al sistema de suministro de agua, así como para dirigir el agua hacia donde se necesite), entre otros; el precio tampoco incluye el costo de instalación.

Una cotización completa de un sistema de bombeo empleando energía fotovoltaica realizado por RC Solar se muestra en la tabla 3.15.

Tabla N° 3.15. Cotización de bomba con energía fotovoltaica.

Ítem	Cantidad	Descripción	Precio unitario (Bs)	Precio Total (Bs)
1	1	Variador de frecuencia Solar Tech, para bomba de 2HP monofásico	8115,00	8115,0
2	8	Módulo fotovoltaico 395W	1350,00	10800,0
3	1	Estructura metálica de montaje para mfv 10x330 con acero galvanizado + dado de hormigón 40x40x50	2800,00	2800,0
4	1	Accesorios de plomería + cableado (15m en DC y 15m en AC) + puesta a tierra	4500,00	4500,0
5	1	Instalación y transporte con mano de obra calificada	5250,00	5250,0
6	1	CPm190 bomba sumergible de 2 HP	5500,00	5500,0
			Total	36965,0
7	34	Tubería PVC de 1"	75	2550,0
			TOTAL	39515,0

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Bombas de ariete.

En Bolivia, las empresas dedicadas a la fabricación de bombas de ariete carecen de cuadros de capacidades de bombeo de donde se pueda evaluar de manera efectiva las opciones disponibles y seleccionar la bomba de ariete adecuada para satisfacer necesidades específicas de bombeo. Sin embargo, la empresa peruana “Hidroaxon” brinda estos cuadros de capacidad de bombeo, de donde se obtienen las alternativas que se muestran en la tabla 3.16.

Tabla N° 3.16. Alternativas de bombas de ariete.

Fabricante	Modelo	Altura de impulso (m)	Altura de bombeo (m)	Distancia (m)	Precio (Bs)
Metalúrgica "San José"	4" con dos válvulas de impulso.	5	50	240	10000,0

"Hidroaxon"	1.5" con dos válvulas de impulso.	5	50	200	4000,0
	2" con dos válvulas de impulso.	5	50	200	4800,0
	3" con dos válvulas de impulso.	5	50	250	6000,0

Fuente: Elaboración propia.

Los precios de las bombas de ariete de "Hidroaxon" únicamente contemplan el costo del equipo, excluyendo los gastos asociados a su instalación (la empresa ofrece servicios de asesoramiento como parte de su oferta, sin embargo, este es un servicio adicional con un costo aparte). Metalúrgica "San José" oferta el equipo e instalación. Los precios de ambos fabricantes no contemplan los conductos de suministro y descarga ni accesorios.

Considerando que la longitud de la tubería de impulsión son 28 metros se requieren 5 tubos de acero galvanizado y para el conducto de descarga de 200 metros se requieren 34 piezas de tubo PVC. El total se muestra en la tabla 3.17.

Tabla N° 3.17. Cotización de bombas de ariete.

Fabricante	Modelo	Diám. tubo de impulsión	Precio tubo galvanizado			Precio conducto de descarga (maguera)		Precio de la bomba	TOTAL (Bs)
			Marca	Unit.	Total	Unit.	Total		
Metalúrgica "San José"	4" con salida de 3/4".	2"	Ipac	464	2322,1	7	1400	10000	13722,1
			Tuper	647,4	3237,0				14637,0
Hidroaxon	1,5" con salida de 3/4".	1,5"	Tuper	500,5	2502,5	7	1400	4000	7902,5

Fabricante	Modelo	Diám. tubo de impulsión	Precio tubo galvanizado			Precio conducto de descarga (PVC)		Precio de la bomba	TOTAL (Bs)
			Marca	Unit.	Total	Unit.	Total		
Hidroaxon	2" con salida de 1".	2"	Ipac	464,42	2322,1	75	2550	4800	9672,1
			Tuper	647,4	3237,0				10587,0
	3" con salida de 1/2".	3"	Tuper	831,82	4159,1	115	3910	6000	14069,1
				1085,5	5427,5				15337,5

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Resultados de la prueba en campo. Prototipo de 1 pulgada.

En la tabla 4.1. se muestran los valores calculados y los valores medidos en campo durante el funcionamiento del ariete hidráulico de 1” a la altura de descarga máxima.

Tabla N° 4.1. Caudal de descarga. Prototipo de una pulgada.

Parámetro	Unidad	Valor calculado	Valor medido
Altura de suministro	m	1,8	1,8
Altura de descarga	m	9,83	9,83
Caudal de alimentación	l/min	25	25
Caudal elevado	l/min	3,16	0,56
Rendimiento volumétrico	%	12,64	2,24

Fuente: Elaboración propia.

En base a la tabla 3.4 se elaboró la curva característica del prototipo de bomba de ariete de 1”. Para generar la curva Caudal de descarga vs Altura de descarga (figura 4.1) en el eje de abscisas se ubicaron las alturas de descarga y en el eje de ordenadas los valores correspondientes al caudal ($Q=V/t$).

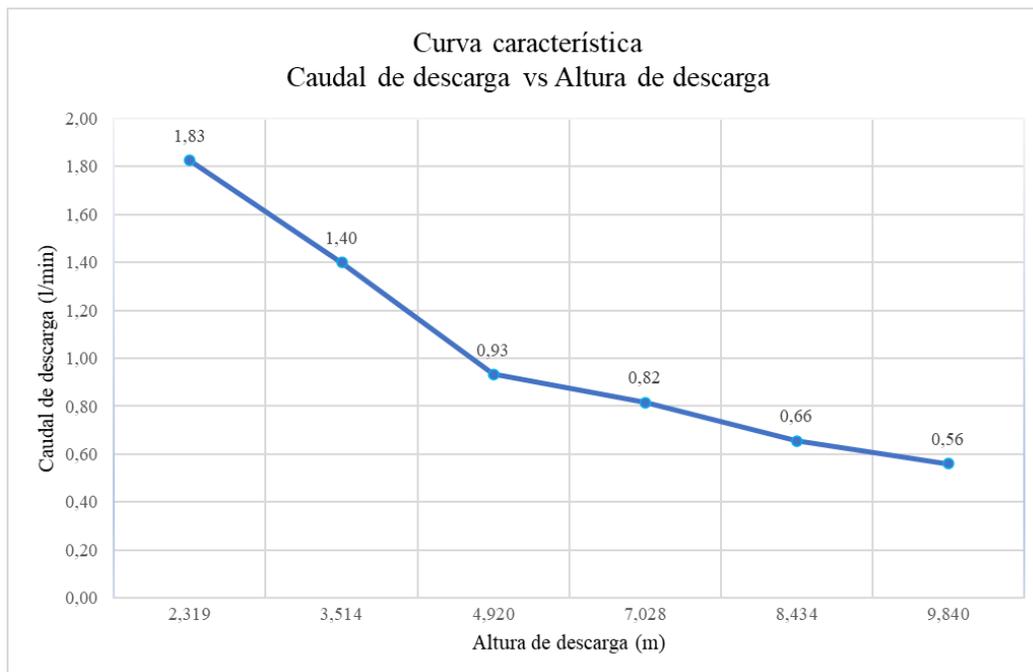


Figura N° 4.1. Curva altura de descarga vs caudal de descarga. Ariete hidráulico de 1”.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Resultados de prueba en campo. Bomba de ariete de 4 pulgadas.

En la tabla 4.2. se muestran los valores calculados y los valores medidos en campo durante el funcionamiento del ariete hidráulico de 4”.

Tabla N° 4.2. Comparación de valores teóricos calculados y obtenidos en campo.

Parámetro	Valor calculado		Valor real medido	
Altura de suministro	5,10	m	5,10	m
Altura de entrega	46,8	m	46,8	m
Caudal de suministro	0,004017	l/s	0,00333	l/s
Caudal de entrega por ciclo	0,0001099	m ³ /s	0,00006	m ³ /s
Eficiencia	36,66	%	16,51	%
Rendimiento volumétrico	2,97%	%	1,80	%

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Curvas características.

En base a la tabla 3.9 se elaboraron las curvas características de la bomba de ariete de 4”.

Para generar las curvas Caudal de descarga vs Altura de descarga (figuras 4.2 y 4.3) en el eje de abscisas se ubicaron las alturas de descarga y en el eje de ordenadas los valores correspondientes al caudal, en este caso el volumen es constante debido a que se empleó un recipiente de 10 litros para todas las mediciones, y el tiempo es el promedio de las tres lecturas realizadas en cada altura de elevación.

En la figura 4.5. se muestran las curvas Golpes por minuto vs Altura de descarga.

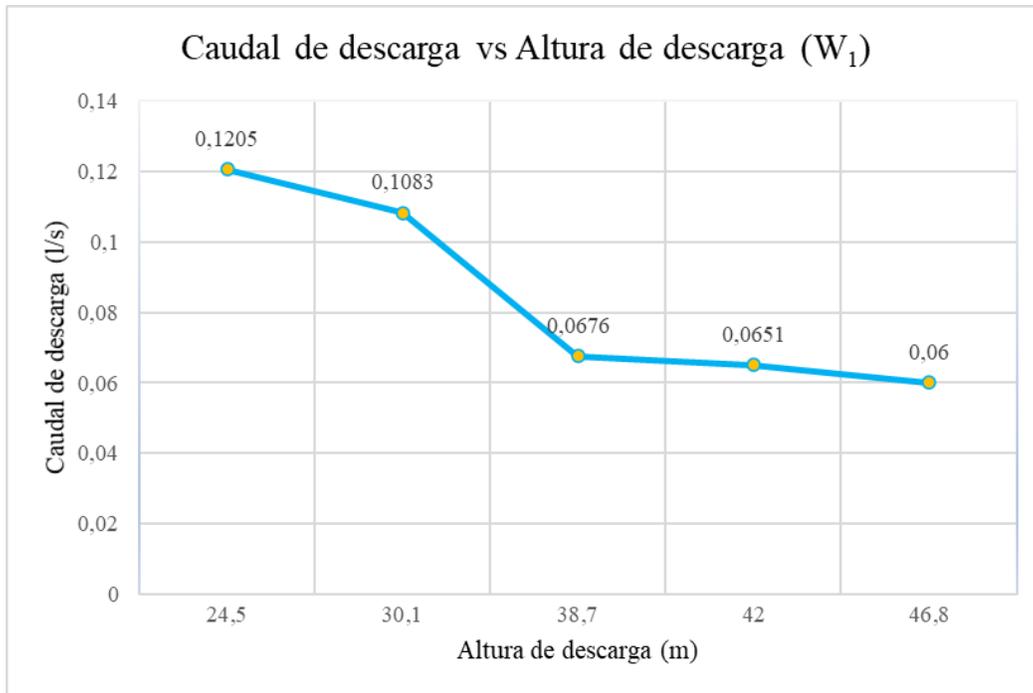


Figura N° 4.2. Caudal de descarga vs Altura de descarga para W_1 .
Fuente: Elaboración propia.

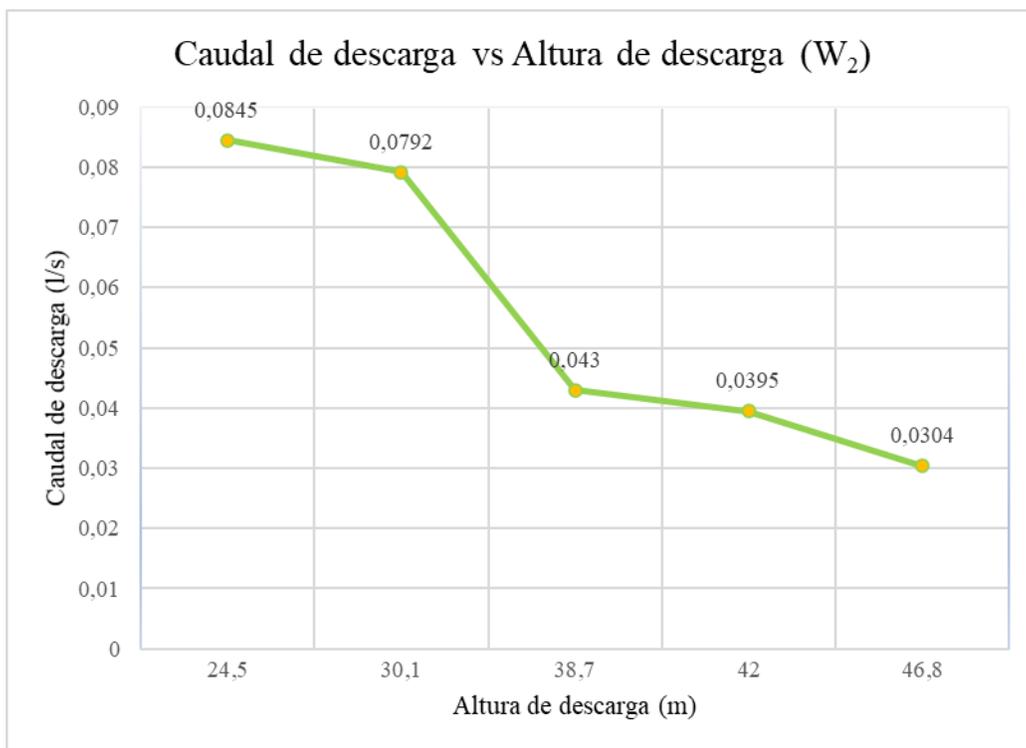


Figura N° 4.3. Caudal de descarga vs Altura de descarga para W_2 .
Fuente: Elaboración propia.

Análisis: A medida que aumenta la altura de descarga el caudal bombeado disminuye. La bomba de ariete convierte una parte del flujo de entrada en presión necesaria para elevar el agua. Cuando se incrementa la altura de descarga, se necesita más presión y energía para elevar la misma cantidad de agua, lo que significa que una mayor proporción del flujo de entrada se destina a generar esta presión en lugar de contribuir al caudal de salida.

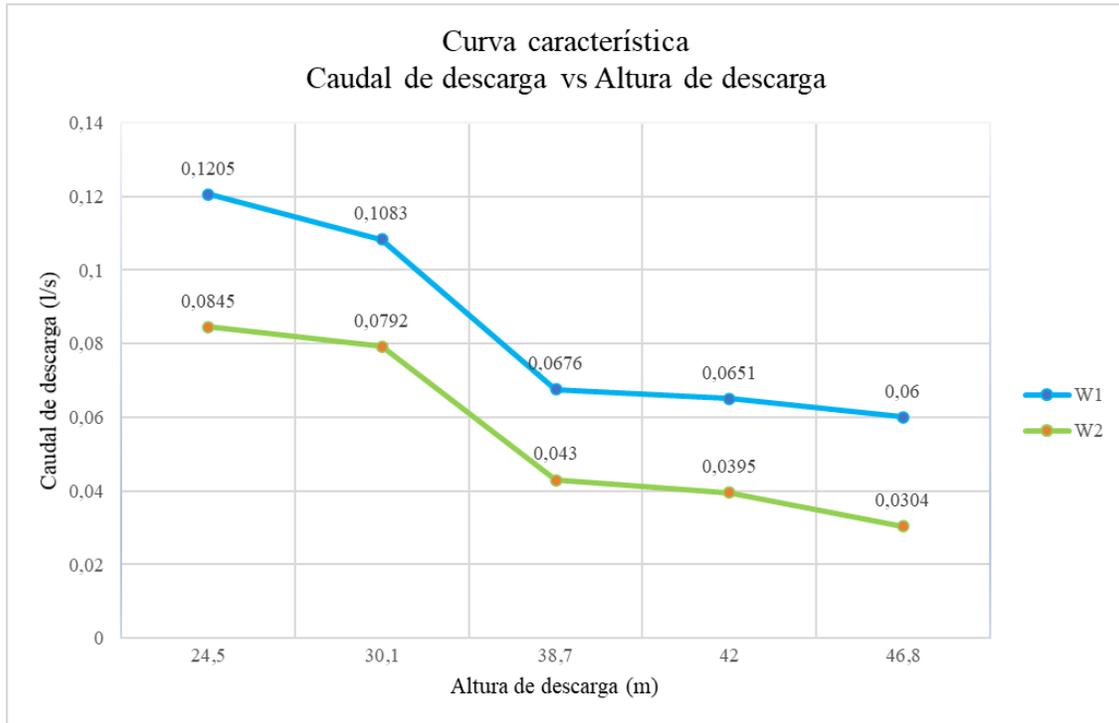


Figura N° 4.4. Altura de descarga vs Caudal de descarga.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis: Los caudales obtenidos habiendo reducido el peso en la válvula de impulso disminuyen en relación a los medidos inicialmente con W_1 .

Reducir el peso en la válvula de impulso en la bomba de ariete hidráulico disminuye el caudal de descarga debido a una menor generación de presión durante cada golpe de ariete. La válvula más ligera se mueve más fácilmente, pero esto no produce la misma inercia necesaria para generar el golpe de presión adecuado. Como resultado, menos agua es impulsada hacia arriba en cada ciclo, lo que reduce el caudal de salida de la bomba.

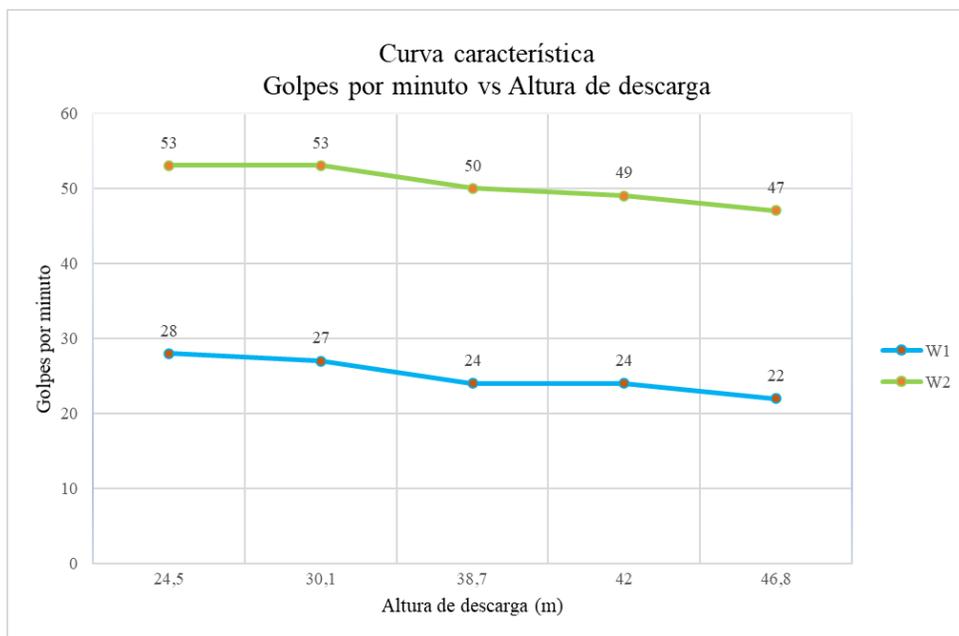


Figura N° 4.5. Golpes por minuto vs Altura de descarga.
Fuente: Elaboración Propia.

Análisis: Hay una relación inversa entre la altura de descarga y la frecuencia de golpes por minuto. Al incrementar la altura de descarga, la frecuencia de golpes disminuye, y viceversa.

4.4. Alternativas de bombeo.

Tabla N° 4.3. Costos de inversión y operación de alternativas propuestas.

Tipo de bomba	Código	Costo de inversión (Bs)	Costo de operación	
			(Bs/mes)	(Bs/año)
Bomba eléctrica	LEO APm110H	4685,0	427,68	5203,44
			752,40	9154,20
			1013,76	12334,08
	PEDROLLO 2CP25/16A	9989,0	855,36	10406,88
			1504,80	18308,40
			2027,52	24668,16
	PEDROLLO F40/250C	24079,0	3576,96	43519,68
			6292,80	76562,40
			8478,72	103157,76
Bomba de energía fotovoltaica	PEDROLLO CPm 190	39515,0	0	0
Bomba de ariete	4" con salida de 3/4"	14637,0	0	0
	1,5" con salida de 3/4"	7902,5	0	0

	2" con salida de 1"	10587,0	0	0
	3" con salida de 1½"	15337,5	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4.4. Resumen comparativo de costos de inversión y operación.

Tipo de bomba	Código	Caudal bombeado a h=40 m y L=200m (l/min)	Costo de inversión (Bs)	Costo de operación en lapso de vida útil 10 años (Bs)	Costo total (Bs)
Bomba eléctrica	LEO APm110H	35,0	4685,0	52034,4	56719,4
Bomba de energía fotovoltaica	PEDROLLO CPM 190	30,0	39515,0	0	39515,0
Bomba de ariete	4" con salida de ¾"	3,5	14637,0	0	14637,0
	3" con salida de 1½"	16,0	15337,5	0	15337,5

Fuente: Elaboración propia.

Análisis: La diferencia porcentual entre el costo total de la opción 1 de bomba de ariete (4" con salida de ¾") respecto a la bomba eléctrica (APm110H) es 74,19% más económica y respecto a la bomba fotovoltaica (CPm 190) es 62,95% más económica.

La diferencia porcentual entre el costo total de la opción 2 de bomba de ariete (3" con salida de 1½") respecto a la bomba eléctrica (APm110H) es 72,96% más económica y respecto a la bomba fotovoltaica (CPm 190) es 61,19% más económica.

4.5. Ventajas y desventajas del ariete hidráulico.

Como toda bomba que eleva el agua de un punto a otro, está sujeto a distintos alcances y limitaciones dentro de los cuales encontramos:

4.5.1. Ventajas

- Elevar una porción del agua a alturas superiores a la altura desde la cual proviene el flujo de agua que la impulsa.
- La bomba de ariete no depende de energía eléctrica o combustibles fósiles, en su lugar aprovecha la propia energía del agua en movimiento para operar. Esta característica

la convierte en una opción sostenible y amigable con el medio ambiente, ya que reduce la dependencia de recursos no renovables y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía convencional.

- Al no requerir energía eléctrica ni combustibles fósiles para su funcionamiento, la bomba de ariete tiene bajos costos de operación a lo largo de su vida útil.
- Cuenta con un ensamblaje sencillo, posee pocas partes móviles, su mantenimiento es simple y muy reducido. Una inspección periódica basta para poder evitar fallas de las diferentes partes de la bomba. Las inspecciones de la bomba pueden hacerse trimestral o anualmente, según esta clase de servicio que otorga la bomba.
- La bomba de ariete se destaca por su fiabilidad y durabilidad a largo plazo, lo que la convierte en una opción atractiva para el bombeo de agua en áreas donde el acceso a servicios de mantenimiento es limitado y se requiere un funcionamiento constante y confiable.

4.5.2. Desventajas

- El funcionamiento y la eficiencia de la bomba de ariete está directamente relacionada con el caudal y la altura de la fuente de agua disponible. Si el caudal es insuficiente o la altura de impulsión es pequeña y la altura de elevación es demasiado grande, la bomba puede no funcionar de manera óptima. Para obtener mejores resultados es necesario tener una altura mínima de 1 metro a donde se encuentra instalado el ariete, para poder ganar energía gravitacional y la presión necesaria para su funcionamiento.
- Sólo una fracción del agua que entra en la bomba se eleva a la altura deseada, mientras que el resto se desperdicia en el proceso, por este motivo se recomienda dejar la bomba a cielo abierto o controlar dicho desperdicio para reutilizarlo.
- Aunque la bomba de ariete es eficaz para el bombeo de agua en pequeñas cantidades, no es adecuada para aplicaciones que requieren grandes volúmenes de agua, como el riego de grandes extensiones de terreno o el abastecimiento de comunidades enteras.
- Requiere ajustes y calibraciones ocasionales para mantener la eficiencia óptima.
- Las válvulas y otras partes pueden obstruirse con sedimentos y escombros, requiriendo limpieza periódica.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

- Las bombas convencionales requieren una mayor cantidad y variedad de personal tanto para la instalación como para la operación y el mantenimiento, debido a su complejidad técnica y a la necesidad de sistemas eléctricos y de control. En contraste, las bombas de ariete hidráulico, debido a su diseño simple y funcionamiento automático, requieren menos personal especializado y menos mantenimiento, lo que resulta en una reducción significativa de costos operativos y de mantenimiento a largo plazo.
- El diseño, construcción y puesta en funcionamiento del prototipo permitieron comprender el principio de funcionamiento, las partes que componen este dispositivo y la sensibilidad de cada una de ellas. Los ajustes precisos en la válvula de impulsión y la configuración adecuada de la altura de caída y la altura de elevación son cruciales para optimizar la eficiencia del sistema.
- Se observa una ligera discrepancia entre los resultados del cálculo teórico y los datos obtenidos de mediciones en campo. Esta diferencia puede atribuirse a diversas razones, principalmente debido a la simplificación de las condiciones reales en los cálculos teóricos y a diversas variabilidades encontradas en el campo, entre ellas se menciona:
 - Los cálculos teóricos asumen que todos los componentes del sistema funcionan perfectamente. En el campo, existe variabilidad en la calidad y el rendimiento de los componentes, como válvulas que no sellan perfectamente, tuberías con pequeñas imperfecciones, etc.
 - Algunos de los factores empleados en el cálculo teórico fueron obtenidos de pruebas experimentales realizadas en laboratorio y por otros fabricantes, estos valores son promedios y no representan con precisión las condiciones específicas de cada instalación, razón por la cual los cálculos teóricos pueden sobreestimar el rendimiento real observado en campo.

- La curva característica de la bomba de ariete de 4" muestra que, a mayores alturas de descarga, el caudal disminuye. A medida que se aumenta la altura de descarga, se requiere más energía para elevar el agua a esa altura mayor. Dado que la energía total disponible del sistema es constante (limitada por la energía cinética inicial del flujo de entrada), el caudal disminuye para compensar el incremento en la energía requerida para alcanzar mayores alturas.
- A mayor altura de descarga, la frecuencia de golpes por minuto disminuye. Esto se debe a que la bomba necesita más tiempo para generar la presión adicional requerida para elevar el agua a una mayor altura. El tiempo que tarda en completar cada ciclo de golpe (apertura y cierre de la válvula) aumenta con la altura de descarga debido a la mayor presión requerida. Esto se traduce en un menor número de golpes por minuto, ya que cada ciclo requiere más tiempo para alcanzar la presión necesaria y completar el golpe. La relación es inversa: mayor altura de descarga, menor frecuencia de golpes por minuto.
- El peso de la válvula de impulso afecta su dinámica de apertura y cierre. Un mayor peso de la válvula aumenta la inercia, haciendo que la válvula tarde más en abrirse y cerrarse. Cuando se reduce el peso de la válvula de impulso, la válvula puede abrirse y cerrarse más rápidamente, pero puede no generar el mismo nivel de presión durante el golpe de ariete. El caudal de descarga depende de la presión generada para elevar el agua a la altura de descarga. La disminución de la presión reduce la cantidad de agua que puede ser empujada hacia arriba en cada ciclo de golpe de ariete, resultando en un menor caudal de descarga.
- La amplia gama de posibilidades en el diseño de arietes hidráulicos subraya la importancia de la investigación y la experimentación continua. el campo de estudio de los arietes hidráulicos es extenso y diversificado, con cada modelo ofreciendo distintas posibilidades y desafíos. lo que hace necesario llevar a cabo pruebas específicas para cada diseño. Los valores y configuraciones óptimas para el funcionamiento de un ariete hidráulico se basan en métodos de prueba y error en el campo.
- La comparación entre una bomba eléctrica, una bomba de ariete hidráulico y una bomba que funciona con energía fotovoltaica presenta desafíos significativos. Las

características del lugar de instalación juegan un papel crucial en la elección de la tecnología adecuada. Factores como la disponibilidad de recursos naturales, la infraestructura existente, las condiciones climáticas y los costos de instalación, operación y mantenimiento deben ser cuidadosamente evaluados. Cada tipo de bomba tiene sus propias ventajas y limitaciones. La diversidad de requerimientos y condiciones hace que la comparación directa entre estas tecnologías sea compleja, resaltando la importancia de un análisis contextualizado y detallado para la toma de decisiones en la implementación de sistemas de bombeo de agua.

5.2. Recomendaciones.

- Desarrollar proyectos que muestren la efectividad y viabilidad de los arietes hidráulicos.
- Promover y apoyar proyectos de bombeo con ariete hidráulico para contribuir a la conservación del medio ambiente.
- Un manómetro proporciona lecturas precisas y continuas de la presión dentro del sistema. La capacidad de medir la presión en tiempo real facilita la detección temprana de problemas como fugas, bloqueos u obstrucciones en el sistema. Con el objetivo de mejorar la eficiencia, seguridad y mantenimiento de las bombas de ariete hidráulicas que fabrica el Sr. Mario Soliz se recomienda incluir un manómetro en el diseño de sus bombas.
- Durante las pruebas realizadas, se detectó la presencia de sedimentos que ingresaron a la bomba, provocando una interrupción en su funcionamiento. Para evitar este problema y asegurar un rendimiento adecuado del sistema, se recomienda enfocar especial atención en el filtro ubicado en la tubería de entrada.
- Se sugiere considerar mejoras en el diseño del tanque de almacenamiento, procurando implementar medidas que reduzcan la entrada de sedimentos al sistema, como la instalación de dispositivos de prefiltrado, incluir un colector de fuente también es una alternativa.